



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

홍 현 선 교수 지도  
석사학위 청구논문

폐 디스플레이 유리 스크랩으로부터  
인듐 회수를 위한  
습식공정 최적화에 관한 연구

2019

성신여자대학교 대학원  
미래응용과학학과  
김 미 소

폐 디스플레이 유리 스크랩으로부터  
인듐 회수를 위한  
습식공정 최적화에 관한 연구

홍 현 선 교수 지도

이 논문을 석사학위논문으로 제출함

2018년 11월

성신여자대학교 대학원

미래응용과학학과

김 미 소

# 인 준 서

김미소의 석사학위 논문으로 인준함

2018년 11월

심사위원장 양 인 목 (서명 또는 인)

심 사 위 원 홍 현 선 (서명 또는 인)

심 사 위 원 김 경 신 (서명 또는 인)

성신여자대학교 대학원

## 논문개요

본 연구에서는 인듐 주석 산화물(Indium Tin Oxide, ITO)이 포함된 폐 디스플레이 패널 유리로부터 희소금속인 인듐을 효과적으로 회수하기 위한 방법을 찾기 위하여 두 가지의 실험을 진행하였다. 첫 번째로 유리 스크랩 컬릿의 크기와 침출 용액의 변화가 인듐 침출 특성에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 침출 실험 결과, 유리 스크랩 컬릿의 크기가 작아질수록 인듐 침출량이 증가하는 경향을 보였으며, 침출 효율은  $\text{HCl} > \text{HNO}_3 > \text{H}_2\text{SO}_4$  순으로 나타났다. 침출 거동을 파악함과 동시에 두 번째로는 실제 업체의 공정 폐액에 포함된 인듐을 간단한 습식 공정을 통해 회수하기 위한 기초 연구로서, 폐액의 pH 변화가 인듐 용매추출률에 미치는 영향을 관찰하였다. 용매추출 실험의 경우에는 A 업체의 초기 공정 폐액 내 인듐 함유량의 평균을 756.8 ppm라고 할 때, 모든 pH 조건에서 추출제 상으로 추출되지 않은 인듐의 양은 4 ppm 미만으로 99.5 % 이상의 추출률을 나타내었다. 해당 공정 폐액은 추가적인 pH 조정 과정 없이도 추출제 D2EHPA에 대하여 높은 추출률을 보이는 것으로 관찰되었다. 이러한 본 연구 결과를 추후 폐유리 공정 폐액으로부터 고순도 인듐을 회수하는 공정 플랜트를 위한 기초 자료로 활용하기 위해서는 회수되는 인듐 외 불순물 함유량에 대한 추가적인 분석 및 연구가 필요하다.

**주제어:** 인듐, 재활용, 침출, 용매추출, 습식공정

# 목 차

## 논문개요

I. 서론 .....	1
II. 이론적 배경 .....	3
1. LCD(액정 디스플레이)에 대한 이해 .....	3
1) 디스플레이의 정의 .....	3
2) LCD 패널의 원리와 구조 .....	5
2. 인듐의 개요 .....	7
1) 인듐의 생산 및 자원 현황 .....	7
2) 인듐의 수요 및 도시광산 측면에서의 재활용 필요성 .....	9
3. 인듐 회수 방법 .....	13
1) 침출 (Leaching) .....	13
2) 용매추출 (Solvent Extraction, SX) .....	16
III. 실험방법 .....	18
1. 침출 실험 .....	18
1) 시료 및 시약 준비 .....	18
2) 실험 장치 .....	18
3) 침출 공정 .....	20

2. 침출 최적화 실험 .....	24
1) 전처리 - 패널 유리 파·분쇄 .....	24
2) 시료 및 시약 준비 .....	27
3) 실험 장치 .....	27
4) 침출 공정 .....	28
3. 용매추출 실험 .....	31
1) 시료 및 시약 준비 .....	31
2) 실험 장치 .....	31
3) 용매추출 공정 .....	33
IV. 실험 결과 및 고찰 .....	37
1. 폐 디스플레이 유리 스크랩으로부터 인듐 침출 실험 .....	37
2. 폐 디스플레이 유리 스크랩으로부터 인듐 침출을 위한 최적 조건 확립 .....	42
1) 파·분쇄 패널 유리 분류 .....	42
2) 유리 스크랩 크기와 침출 용액 변화에 따른 인듐 침출 거동 파악 .....	44
3. 인듐 회수 공정 폐액으로부터 인듐 추출을 위한 조건 탐구 .....	50
V. 결론 .....	54

참고문헌

Abstract

## 표 목차

표 1. 국가별 디스플레이 시장 점유율 (단위 : %)	12
표 2. 침출 실험의 실험 변수 조건	20
표 3. 침출 실험의 공통 실험 조건	21
표 4. 폐 디스플레이 유리 스크랩을 크기별로 분류 시 사용한 체의 크기	25
표 5. 침출 실험의 유리 스크랩 크기와 침출 용액 변화 조건	28
표 6. 침출 최적화 실험의 공통 실험 조건	29
표 7. 용매추출 실험 pH 조건	33
표 8. 용매추출 실험의 공통 실험 조건	34
표 9. 용매추출 실험 시 초기, 조정, 용매추출 후 pH와 NaOH 투입량	52

## 그림 목차

그림 1. 디스플레이 발전 과정 .....	4
그림 2. LCD 패널의 구조 .....	6
그림 3. 전 세계 아연 매장량의 국가별 비율, 2018년 기준 .....	8
그림 4. 전 세계 인듐 생산량(2016 ~ 2017년) .....	8
그림 5. 디스플레이 시장 전망(금액기준 / 단위 : 억불) .....	11
그림 6. LCD 내 ITO 층의 SEM 분석 이미지 a) LCD 패널을 왕수로 침출 전, b) 침출 후 .....	14
그림 7. 용매추출 과정 도식 .....	17
그림 8. 침출 실험 장치 모식도 .....	19
그림 9. 폐 디스플레이 패널 유리 스크랩으로부터 인듐 침출 실험 과정 ...	23
그림 10. 파·분쇄 패널 유리의 분리 과정 .....	26
그림 11. 용매추출 실험 장치 모식도 .....	32
그림 12. 인듐 회수 공정 폐액으로부터 인듐 용매추출 실험 과정 .....	36
그림 13. 침출 용액 농도 변화에 따른 인듐 침출량 .....	38
그림 14. 침출 용액 종류 변화에 따른 인듐 침출량 .....	39
그림 15. 유리 스크랩 크기 변화에 따른 인듐 침출량 .....	40
그림 16. 파·분쇄한 LCD 패널 유리를 체로 분류하였을 때 사진 (a) residue, (b) #7 ASTM E11, (c) #12 ASTM E11, (d) #18 ASTM E11, (e) #30 ASTM E11, (f) #50 ASTM E11, (g) 다양한 크기의 ASTM E11체를 사용하여 분류한 패널 유리의 평균 크기 .....	43
그림 17. 유리 스크랩 컬릿 크기 변화에 따른 인듐 침출량; HCl .....	45
그림 18. 유리 스크랩 컬릿 크기 변화에 따른 인듐 침출량; H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	46

그림 19. 유리 스크랩 컬릿 크기 변화에 따른 인듐 침출량; $\text{HNO}_3$ .....	47
그림 20. 유리 스크랩 컬릿 크기 변화에 따른 인듐 침출량 비교 .....	48
그림 21. A 업체의 공정 폐액에 포함되어 있는 인듐의 평균량 .....	51
그림 22. 용매추출 반복실험 결과 용매추출률 그래프 .....	53

## I. 서론

현대 사회의 정보화 및 IT산업이 급격히 발달함에 따라 LCD(Liquid Crystal Display)와 같은 디스플레이 제품의 수요량이 지속적으로 증가하고 있으며, 이와 함께 많은 양의 디스플레이 폐기물이 발생될 것으로 예상되고 있다(홍현선 외 3인, 2010). 국내 폐 디스플레이 중 일부는 리사이클링 센터에 수거되어 수작업으로 해체·분리하여 재활용되고 있지만 이는 디스플레이의 플라스틱 케이스와 금속 프레임 등 재활용이 가능한 부품에 한하며, 이를 제외한 LCD 패널 등은 대부분 매립 또는 소각으로 인하여 디스플레이에 포함되어 있는 고부가가치의 희소금속은 재활용되지 못하고 버려지고 있는 실정이다(R&D 정보센터, 2016).

박막일 때 높은 전기 전도도와 투명도를 동시에 가지는 특성으로 인해 디스플레이 제품의 투명전극에 널리 사용되는 소재인 인듐 주석 산화물(Indium Tin Oxide, ITO)은 디스플레이 산업의 발달로 인해 그 수요가 계속 증가하고 있다(Zhang et al., 2017). 전 세계에서 생산되는 인듐의 절반 이상이 ITO를 생산하는데 소비되고 있고, ITO에서 가장 많은 양을 차지하는 인듐은 자원 고갈의 위험성이 높은 희소금속이지만 국내에서는 LCD 패널의 대부분이 폐기 및 소각으로 인하여 ITO로부터 국가전략희소금속인 인듐이 전혀 회수되지 못하고 있다(European Commission, 2015; 이희민 외 4인, 2010).

최근 ITO 스크랩, ITO 페타겟, ITO 에칭액 등에서 인듐, 주석 등의 분리와 회수에 관련된 연구들이 진행되고 있으나, LCD 패널로부터 인듐을 분리 및 회수와 관련된 연구는 아직 미흡한 실정이다(홍현선 외 3인, 2010; 이희민 외 4인, 2010; 2008; Park et al., 2007). 따라서 폐 디스플레이 패널로부터 인듐의 효율적인 재활용 측면에서 인듐 회수를 위한 최적 조건에 대한

연구가 요구되고 있다.

이에 본 연구에서는 ITO가 포함된 페 디스플레이 패널 유리로부터 회수 금속인 인듐을 효과적으로 회수하기 위한 방법을 찾기 위하여 두 종류의 실험을 진행하였다. 첫 번째로는 유리 스크랩 컬릿 크기와 침출 용액의 변화가 인듐 침출 특성에 미치는 영향에 대해 알아보려고 하였다. 컬릿 크기 변화를 위한 스크랩 과·분쇄 전처리를 진행하였으며, 침출 용액으로 HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>을 사용하여 인듐 침출을 위한 최적 조건을 확립하고자 하였다.

ITO 페타겟과 같이 2차 자원에서 용매추출 방법을 이용하여 인듐을 회수하는 방법에 대한 선행 연구들은 800 °C 이상의 고온에서 열처리가 필요하거나(이기웅 외 4인, 2014), 용매추출의 최적 조건을 찾기 위한 침출 용액을 InCl<sub>3</sub>, SnCl<sub>2</sub>, In<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·xH<sub>2</sub>O와 같은 시약을 증류수 등에 용해시켜 모사하는 방법을 사용하였다(이만승, 안중관, 2014; Virolainen et al., 2011; Lupi and Pilone, 2014; Pereira et al., 2018).

이에 본 연구에서는 인듐 침출 거동을 파악함과 동시에 두 번째로 실제 업체에서 나오는 공정 폐액에서 간단한 습식 공정을 통해 인듐을 회수하기 위한 기초 연구로서, 폐액의 pH 변화가 인듐 용매추출물에 미치는 영향을 관찰하였다.

## Ⅱ. 이론적 배경

### 1. LCD(액정 디스플레이)에 대한 이해

#### 1) 디스플레이의 정의

디스플레이는 전자기기로부터 출력되는 전기신호를 시각을 통해 화상 정보로 나타내어 주며, 다양한 정보를 인간이 볼 수 있도록 화면으로 구현해주는 영상 표시장치를 통칭한다(국가기술표준원, 2017). 디스플레이는 자체 발광할 수 있는 PDP(Plasma Display Panel)와 OLED(Organic Light Emitting Diodes) 같은 자발광 디스플레이와 자체발광을 할 수 없고 별도의 광원이 필요한 LCD와 같은 수발광 디스플레이로 구분된다. 국내 디스플레이 산업은 1966년 금성사(현 LG전자)에서 일명 브라운관 TV라고 부르는 CRT(Cathode Ray Tube) TV를 국내 최초로 생산 및 보급하며 성장하기 시작하였고, 평판 디스플레이를 거쳐 OLED, Flexible Display 등의 차세대 디스플레이로의 전환이 나타나고 있다.

평판 디스플레이는 브라운관보다 얇은 LCD, PDP, OLED 등의 디스플레이를 통칭하는 용어인데, 발전 초기에 PDP와 LCD가 대표적 기술로서 경쟁하였다. 경쟁 결과 PDP는 색상표현, 응답속도 등에서 LCD보다 우수한 성능을 보였지만 범용성이 부족하고 방전 방식에 따른 높은 소비전력이 발생하는 등의 기술적 한계로 인하여 LCD와의 경쟁에서 패하였으며, 현재는 LCD가 글로벌 디스플레이 시장의 주류를 차지하고 있다.

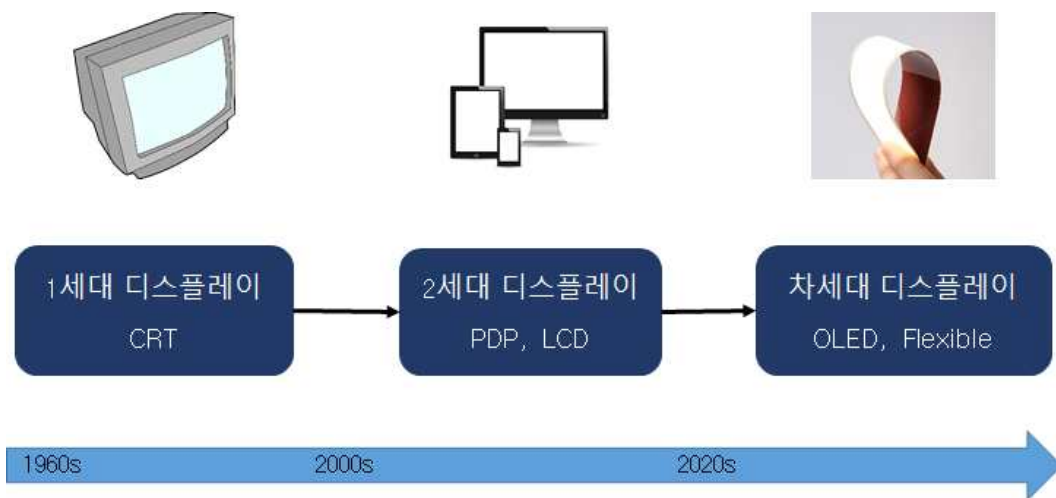


그림 1. 디스플레이 발전 과정<sup>1)</sup>

1) 차세대 디스플레이 그림 출처 : LG OLED light(Luflex), [www.lgoledlight.com](http://www.lgoledlight.com)

## 2) LCD 패널의 원리와 구조

액정은 1888년 오스트리아의 F. Reinitzer라는 생물학자에 의해 발견되었고, 독일 물리학자 O. Lehmann이 액체처럼 흐르는 성질을 가지면서 고체와 같은 결정 구조를 갖는다는 의미로 이 물질을 ‘액정’이라고 명명하였다(한국 디스플레이산업협회, 2007).

액정은 유동성을 갖는 액체와 규칙적인 결정 구조를 갖는 고체의 특징을 동시에 갖는 유기 화합물질이다. 광학적 이방성<sup>2)</sup>을 가지며 전압이 가해질 때 전계 방향을 따라 액정의 분자배열이 바뀌면서 빛을 통과시키거나 차단하는 방식으로 화면을 만드는 특성을 가지고 있다. 이러한 성질을 이용하여 문자, 그림 또는 도형을 표시하는 장치를 LCD라고 한다. LCD는 자기 발광성이 없어 백라이트를 필요로 하지만 소비전력이 적고 휴대용으로 편리하여 TV, 데스크톱, 휴대전화, 노트북, 태블릿을 포함한 다양한 애플리케이션에 널리 쓰이고 있다.

그림 2는 LCD 패널의 구조를 나타낸 것이다. LCD 패널은 편광 필름, 액정, 컬러 필터, ITO(Indium Tin Oxide) 필름 등으로 구성되어 있다. ITO는 약 90 wt%의  $In_2O_3$ 와 10 wt%의  $SnO_2$ 로 구성된 재료로서 가시광선 영역에서는 투광 특성이, 적외선 영역에서는 반사 특성이 우수하며 비교적 낮은 전기저항을 갖는 상온에서 안정한 산화물이다(이영인, 좌용호, 2012). 이러한 특성으로 인하여 ITO는 디스플레이 제품의 투명 전극 재료로 사용되는 핵심적인 물질이 되었다. ITO의 대부분을 차지하는 인듐은 한국, 일본, 미국 등에서 희소금속<sup>3)</sup>으로 정의하고 있고, 글로벌 인듐 사용량의 대부분이 ITO

---

2) 이방성 : 방향에 따라 분자 배열 방향이나 물리적 특성이 다른 성질

3) 희소금속 : ①지각 내 존재량이 적거나 경제성 있는 추출이 어려운 금속 중 현재 산업적 수요가 있고 향후 성장이 예상되는 원소, ②극소수의 국가에 매장량과 생산이 편재되거나 특정 국가에서 전량을 수입하여 공급에 위험성이 있는 원소, 한국희소금속산업기술센터,

를 생산하는데 요구된다는 점에서 디스플레이 산업의 발전과 더불어 인듐은 한정된 매장량과 높은 산업수요 등으로 인하여 ITO 폐타겟과 같은 2차 자원으로부터 인듐 회수 및 재활용에 관한 연구가 진행되었다.

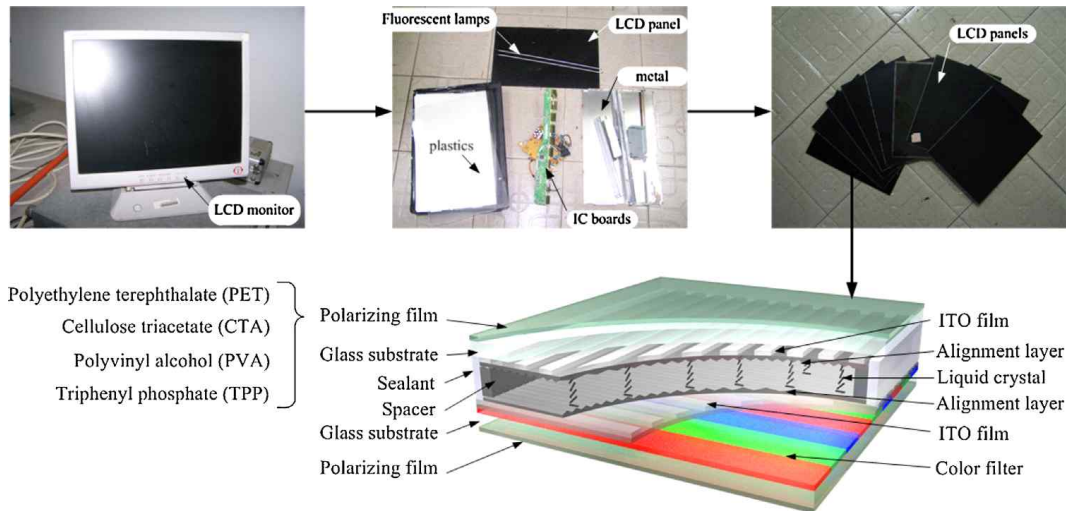


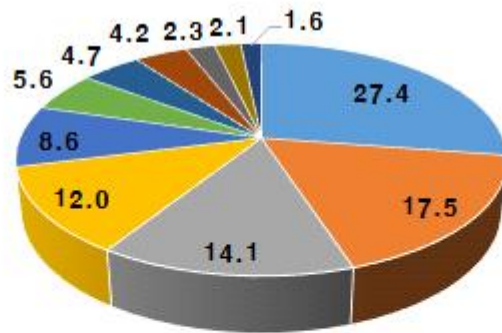
그림 2. LCD 패널의 구조(Ma and Xu, 2013)

## 2. 인듐의 개요

### 1) 인듐의 생산 및 자원 현황

인듐은 원자번호 49번의 금속원소로 원소기호는 In, 1863년 독일의 F. Reich와 H. T. Richter가 발견하였다. 그들은 탈륨을 검출하기 위하여 독일 프라이부르크에 있는 아연 광의 제련 잔재를 스펙트럼 분석하였는데, 과거에는 보고되지 않았던 미지의 원소의 스펙트럼 패턴을 발견하였다. 발견된 스펙트럼의 색깔은 짙은 남색(Indigo)이며, 이것을 따서 인듐(Indium)이라고 명명되었다(김정곤, 2012).

지각에서의 인듐은 전 세계적으로 약 50 ~ 200 ppb의 농도로 매장되어 있는데 산업에 사용되는 인듐은 단일광에서 얻어지기보다는 아연(Zn), 동(Cu), 철(Fe), 주석(Sn), 니켈(Ni) 및 납(Pb)의 황화합물/황염광물을 제련하는 과정에서 발생하는 잔류물(Residue), Fume, Dust, Slag 및 Slag 처리 찌꺼기(Dross)를 처리하는 과정에서 갈륨(Ga), 은(Ag) 및 금(Au)과 함께 부산물의 형태로 생산되고 있다(엄성현 외 2인, 2015). 이 중 가장 큰 비율을 차지하는 것은 아연 제련과정에서 부산물로 얻어지는 것이며(Li et al., 2015, 재인용), 때문에 아연 매장량을 근거로 인듐 매장량을 추정할 수 있다. 미국지질조사소가 2018년에 조사한 통계에 의하면 2017년 기준 아연 매장량은 호주, 중국, 페루 순으로, 아연의 전 세계 매장량은 23만 톤이고, 채굴량은 약 1만 3천 톤으로 매장량의 가용년수는 10 ~ 20년 정도로 예상되고 있다. 또한 전 세계적으로 생산되는 인듐의 양은 약 720 톤이며, 중국이 310 톤, 우리나라가 215 톤으로 1, 2위로 집계되었다(USGS, 2018).



- Australia
- Peru
- India
- Bolivia
- China
- Mexico
- United States
- Sweden
- Other Countries
- Kazakhstan
- Canada

그림 3. 전 세계 아연 매장량의 국가별 비율, 2018년 기준

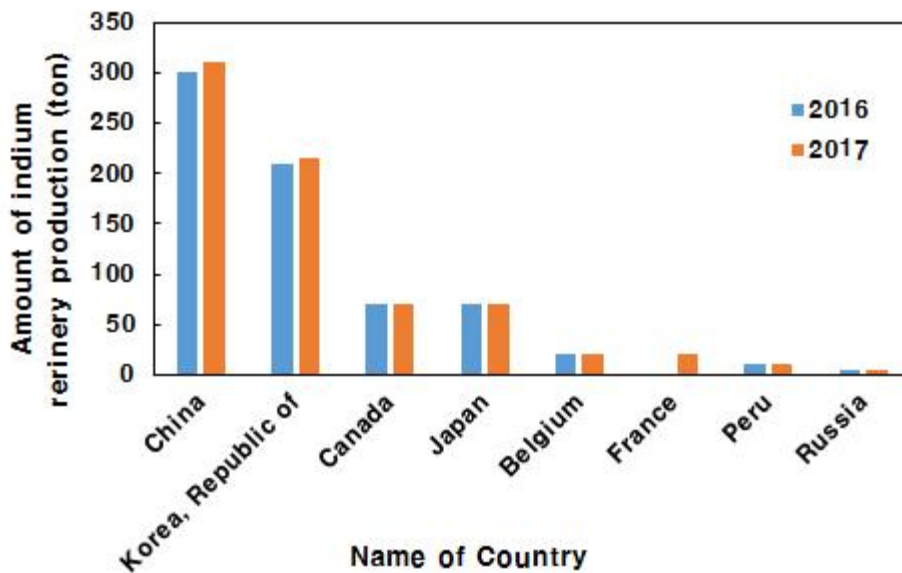


그림 4. 전 세계 인듐 생산량(2016 ~ 2017년)

## 2) 인듐의 수요 및 도시광산 측면에서의 재활용 필요성

21세기로 들어서면서 브라운관 TV와 같은 1세대 디스플레이가 쇠퇴하고 LCD, OLED와 같은 2세대 디스플레이가 자리 잡으면서 디스플레이 산업은 발전을 거듭했다. 디스플레이 산업이 발전한다는 것은 투명 전극으로 사용되는 ITO의 수요가 늘어난다는 것이었고, 이는 결과적으로 인듐의 수요량 급증과 가격 상승으로 이어졌다.

현재 디스플레이 시장은 지속적인 성장세를 보이며 2023년에는 1,221억 달러 규모로 전망하고 있다(국가표준기술원, 2017, 재인용). 국가별 디스플레이 시장 점유율 측면에서는 2012년부터 2018년 상반기까지 한국이 평균 점유율 45 % 이상으로 세계 1위를 유지하고 있다. LCD의 경우 중국의 몰락 공세로 국내의 삼성디스플레이와 LG디스플레이 같은 기업들은 OLED 부문을 확충하고 세계 시장에서 우위를 선점하려고 노력하고 있다. 같은 기간 동안 OLED 시장 점유율의 경우 한국이 평균 95 % 이상의 점유율을 보이고 있다(한국디스플레이산업협회, 2018, 재인용). 이와 같은 디스플레이 산업의 지속가능성을 위해서는 자원 고갈과 가격 상승의 위험이 있는 인듐 공급에 대한 안전성을 확보하는 것이 중요하고 다양한 연구에서 그 방안 중 하나로 도시광산<sup>4)</sup>을 제시하고 있다(삼성경제연구소, 2011; 오재현 외 3인, 2010; Cossu and Williams, 2015).

현재까지 우리나라는 디스플레이 시장에서 세계 1위의 산업 규모에도 불구하고 국내에서 발생하는 디스플레이의 수집량 및 폐기량에 대한 체계적이고 구체적인 통계 파악은 이루어지지 않고 있다. 다만 디스플레이의 생산량을 바탕으로 제품의 예상 수명을 10년으로 가정할 경우 2015년 이후 약 200 ~ 300만 대의 폐LCD 제품이 발생할 것으로 예측 되었다(강이승 외 4인,

4) 도시광산 : 폐 가전제품과 산업폐기물과 같은 제품 내에 축적된 금속자원 중 일련의 재활용 과정을 통하여 자원화할 수 있는 금속 또는 관련 산업, 삼성경제연구소, 2010

2015). 황화물인 섬아연석과 같은 1차 자원의 제련과정에서 부산물로 인듐을 생산하는 경우 얻을 수 있는 인듐의 양은 대략 1 ~ 100 ppm 정도인데 반해 LCD에는 제조년도, 회사, 제품 등에 따라 100 ~ 400 ppm의 인듐이 함유되어 있다(Alfantazi and Moskalyk, 2003; Rocchetti et al., 2015, 재인용). 그럼에도 불구하고 현재 1개의 폐 LCD 패널에 포함되어 있는 인듐의 양으로는 재활용을 하는 것이 경제적이지 않게 보일수도 있지만 LCD 패널을 체계적으로 취합할 수 있는 시스템이 갖추어진다면 도시광산의 측면에서 볼 때 1차 자원에서 인듐을 생산하는 것보다 이점이 있을 것으로 판단된다 (Yang et al. 2013). 이와 같은 상황에 비추어볼 때 적절한 과정을 통하여 폐 LCD 제품에서 고농도의 인듐을 회수 및 재활용하기 위한 방안에 대한 적극적인 연구가 필요하다.

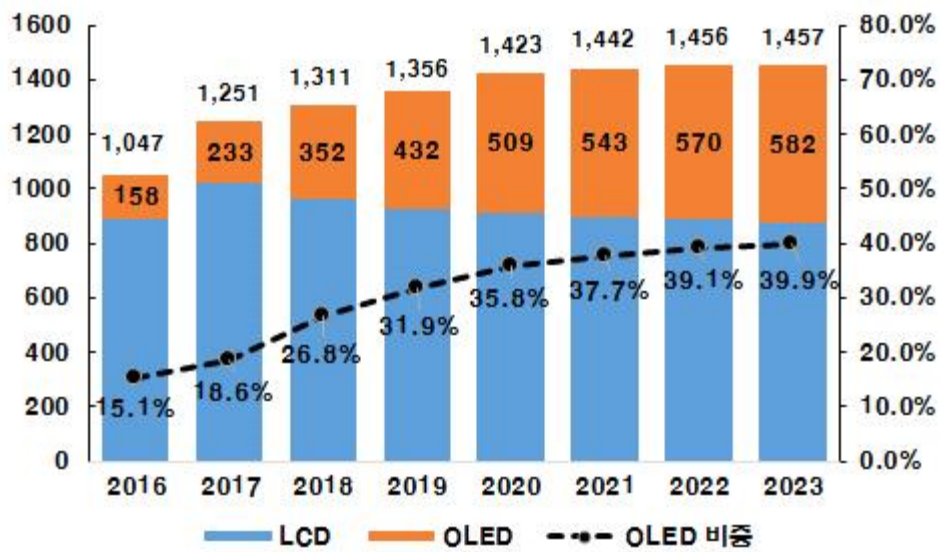


그림 5. 디스플레이 시장 전망(금액기준 / 단위 : 억불)<sup>5)</sup>

5) 출처 : 한국무역보험공사, 2018, 재인용

표 1. 국가별 디스플레이 시장 점유율 (단위 : %)<sup>6)</sup>

국가	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018 上
한국	50.7	44.7	42.8	45.2	45.8	44.4	41.9
대만	25.7	28.1	28.8	24.6	21.3	19.5	20.0
일본	14.6	15.5	15.0	15.4	14.3	14.1	12.8
중국	8.2	10.5	12.5	14.1	17.6	21.0	24.1
기타	0.7	1.2	0.9	0.6	0.9	0.9	1.2

6) 출처 : 한국디스플레이산업협회, 2018, 재인용

### 3. 인듐 회수 방법

#### 1) 침출 (Leaching)

일반적으로 입자형태 또는 분말형의 고체원료 물질 중 목적성분을 용액 속에 용해시키는 것을 침출이라고 한다. 인듐의 경우에는 HCl 또는 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 등과 같은 산 용액을 사용하여 침출을 하며, 다량의 인듐을 회수하기 위해서는 폐 디스플레이에 존재하는 ITO에서 유가금속을 효과적으로 침출하는 것이 중요하다.

그림 6은 LCD 패널 내의 ITO 층을 SEM으로 분석한 이미지를 나타낸 것이다. 그림 6.a는 왕수로 침출 전 ITO 층이 잘 보이는 것을 확인할 수 있고, 그림 6.b는 침출 후 왕수에 ITO가 용해되어 더 이상 보이지 않는 것을 확인할 수 있다(Yang et al., 2013).

ITO는 인듐과 주석의 산화물로 구성되어 있고, 침출 시 산 용액과의 주요 반응식을 나타내면 다음과 같다(Li et al., 2011).



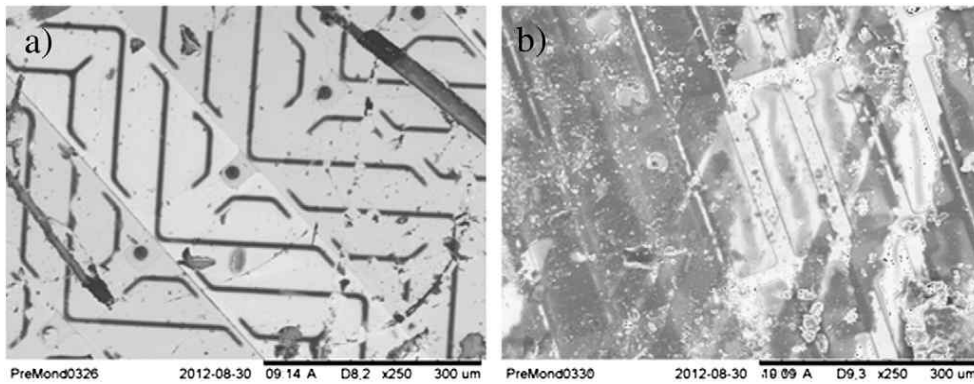


그림 6. LCD 내 ITO 층의 SEM 분석 이미지 a) LCD 패널을 왕수로 침출 전, b) 침출 후(Yang et al., 2013)

인듐을 효과적으로 침출하기 위해서는 인듐 산화물을 모두 이온화시킬 충분한 양의 수소 이온과 반응을 활성화시킬 수 있는 물리적인 조건의 최적화가 요구된다. 학계에는 납, 아연 제련공정 후 잔여물에서 인듐을 회수하기 위한 연구가 보고되어 왔으며, 폐 디스플레이 또는 폐 휴대폰 등의 LCD에서 인듐을 회수하기 위한 연구도 보고되고 있다. 최근 인듐 회수에 관한 연구의 경우 침출만 단독적으로 시행하는 경우는 거의 없으며, 용매추출과 함께 연구되고 있는데 다음과 같은 방법이 소개되고 있다.

Sawai et al. (2015)는 lead-smelting dust(LSD)에서 인듐을 회수하기 위해서 LSD와 혼합 산 용액( $0.02 \text{ mol/g HCl} / 0.04 \text{ mol/g H}_2\text{SO}_4$ )을 섞은 후 상온에서 24 시간 180 rpm으로 교반하며 침출하는 방법을 소개하였고, Zhang et al. (2017)은 autoclave에 lead smelting hazardous dust(LSHD)와  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 을 L:S ratio(고-액 비율) = 3-5:1 로 혼합하여 장입한 후,  $140 \sim 160 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 온도를 유지하며 1 시간동안 침출하는 방법을 소개하였다. Fontana et al. (2015)는 폐LCD로부터 인듐을 회수하는 방법에 대해 연구하였다. 침출 실험은 앞서 언급한 연구와 비슷하게 인듐을 침출하기 위한 타겟 물질(LCD)와 산 용액을 상온에서 일정 시간 교반하는 방법을 사용하였는데, 이 연구에서 주목할만한 점은 침출 시 산 용액과 ITO의 접촉 면적을 증가시켜 침출 효율을 향상시키기 위하여 아세톤과 같은 유기용매로 편광필름을 제거하였다는 것이다. 또한 폐LCD 패널로부터 인듐을 침출할 때 초음파를 사용하여 용액 교반 및 침출 효율을 높이기 위한 연구도 발표되고 있다(Zhang et al., 2017; Souada et al., 2018).

## 2) 용매추출 (Solvent Extraction, SX)

용매추출은 일반적으로 수용액과 유기용매와 같은 서로 섞이지 않는 두 가지의 액체에 대한 특정 물질의 상대적 용해도를 이용하여 목적 금속을 용액에서 분리하는 방법이다. 용매추출을 통해 인듐을 회수하려는 연구는 1960년대부터 이루어지기 시작했다(Paiva, 2001). 용매추출 시 사용하는 추출제는 저마다 금속에 대한 selectivity<sup>7)</sup>가 다르기 때문에 분리·회수하고자 하는 목적금속에 따라 그와 잘 맞는 추출제를 사용하여야 한다.

추출제의 종류에는 D2EHPA, Cyanex 272와 같은 산성 추출제와 Adogen 283, Alamine 336과 같은 염기성 추출제, TBP, TOPO와 같은 중성 추출제, LIX 63, LIX 84와 같은 킬레이트 추출제 등이 있다. 이 중에서 D2EHPA는 인듐에 대하여 selectivity가 좋다고 알려져 추출제로 주로 쓰이고 있다 (Wang and Lee, 2013).

타겟 물질로부터 산성 용액으로 침출 후 인듐 분리·회수를 위하여 D2EHPA를 추출제로 용매추출한 연구들은 크게 D2EHPA를 kerosene에 희석하여 사용하는 경우와 D2EHPA와 다른 추출제 또는 다양한 희석제 간의 추출 효율을 비교·분석하는 경우로 나눌 수 있다.

전자의 경우는 Ruan et al. (2012), 김성규, 이화영 (2000), Li et al. (2015), Virolainen et al. (2011), Pereira et al. (2018) 등의 연구가 보고되었으며, 주로 D2EHPA의 희석 비율을 변화시키며 추출 효율을 비교하였다. 후자의 경우는 산성 추출제인 D2EHPA, Cyanex 272와 킬레이트 추출제인 LIX 984 등의 추출 효율을 비교하는 경우(Lupi and Pilone, 2014), 중성 추출제인 TBP와 아민계 추출제인 TOA, TEHA, Aliquat 336 등의 추출 효율을 비교하는 경우(이만승, 안종관, 2015), 산성 추출제 Cyanex 923를

7) 다양한 원소가 녹아 있는 시료를 용매추출하여 목적 금속을 얻고자 할 때, 불순물 원소량이 적고 목적 금속만 얻을 수 있는 추출제가 해당 금속에 대한 selectivity가 높다.

Kerosene, Toluene, n-Hexane, Xylene 등에 희석하였을 때, 결과를 분석한 경우(Gupta et al., 2004), 킬레이트 추출제인 LIX 973N을 추출제로 사용하는 경우(Alguacil, 1999), Sodium Tripolyphosphate(삼인산나트륨,  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ )을 추출제로 사용하는 경우(Jiang et al., 2011) 등이 보고되었다.

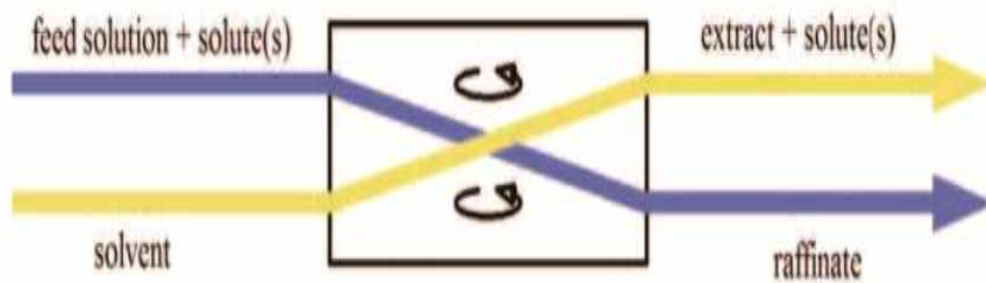


그림 7. 용매추출 과정 도식<sup>8)</sup>

8) 그림 출처 : [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/db/Solvent\\_extraction.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/db/Solvent_extraction.jpg)

### Ⅲ. 실험방법

#### 1. 침출 실험

##### 1) 시료 및 시약 준비

본 연구에서는 폐 디스플레이 유리 스크랩으로부터 희소금속인 인듐을 침출의 최적조건을 찾기 전 인듐 침출량에 가장 큰 영향을 미치는 변수를 찾기 위한 예비 실험을 진행하였다. 침출 용액으로는 Hydrochloric acid (HCl, 36.5 ~ 38 %, J.T.Baker, ACS), Sulfuric acid (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 95 %, DAEJUNG, GR), Nitric acid (HNO<sub>3</sub>, 69 ~ 70 %, J.T.Baker, ACS), Acetic acid (CH<sub>3</sub>COOH, 99.5 %, DAEJUNG, EP)와 같은 4 가지 산을 사용하였다.

##### 2) 실험 장치

인듐 침출을 위하여 실험 장치를 그림 8과 같이 세팅하였다. 500 mL 3-neck 플라스크를 실험 체임버로 사용하였고, 침출 용액인 산으로 인해 부식되는 것을 방지하기 위해서 테플론 소재의 임펠러를 사용하였다. 온도 조절이 가능한 히팅 맨틀로 체임버를 가열하면서 오버헤드 스테러로 교반하였다. 콘덴서를 장착하여 가열로 인한 손실을 줄이고자 하였다.

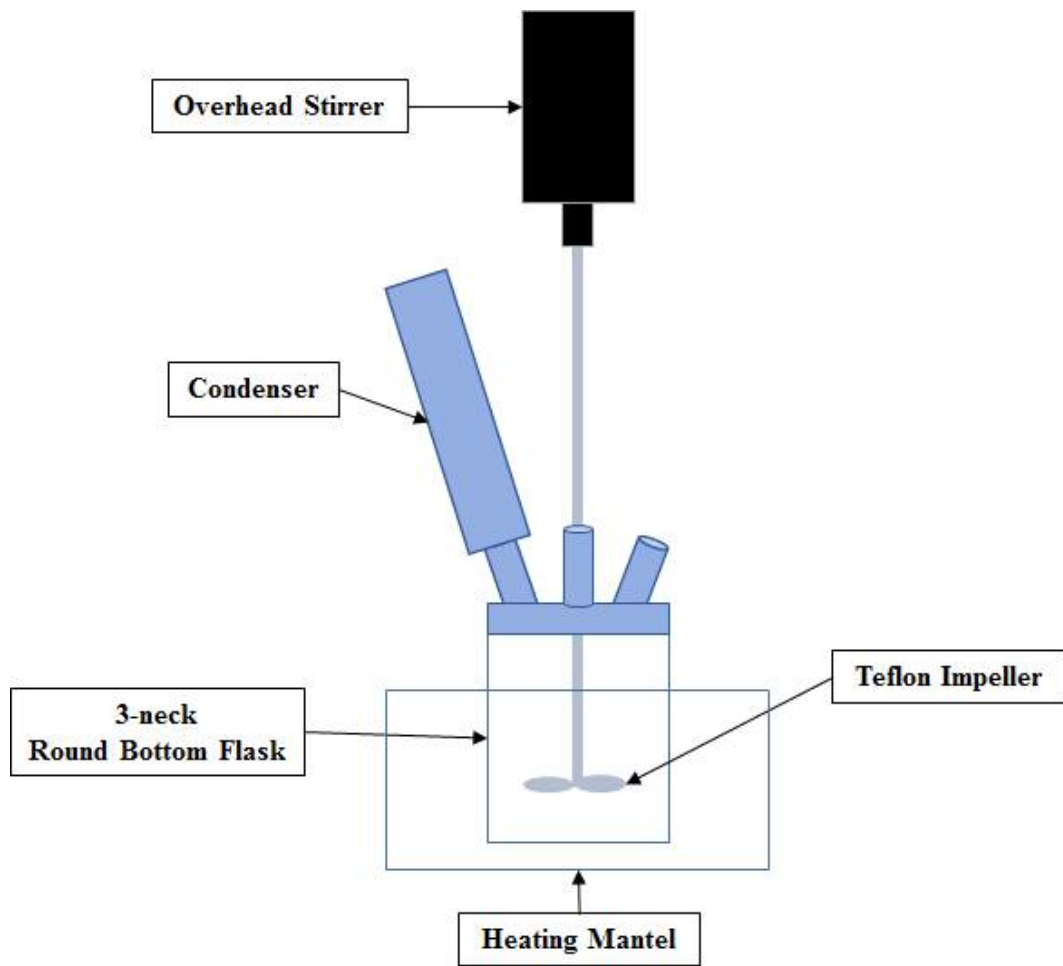


그림 8. 침출 실험 장치 모식도

### 3) 침출 공정

침출 실험은 침출 용액의 농도, 침출 용액의 종류, 침출 스크랩 크기 등의 총 3 가지를 변수로 하여 인듐 용출량의 변화를 알아보고자 하였다. 침출 용액의 농도 변화 조건에서는 1 ~ 4 M의 HCl을 사용하였으며, 침출 용액 종류 변화 조건에서는 침출 용액으로 HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>COOH 등의 4 가지의 산을 사용하였다. 스크랩 크기 변화 조건에서도 총 4 가지 크기의 서로 다른 컬릿을 사용하였다. 자세한 침출 실험 조건을 표 2 ~ 3에 나타내었다.

표 2. 침출 실험의 실험 변수 조건

Experimental Factor				
HCl Concentration (M)	1	2	3	4
Acid	HCl	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HNO <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub> COOH
Size of Glass Cullet(cm)	2.2 X 1.2	1.0 X 1.0	0.8 X 0.6	< 0.8 X 0.6

표 3. 침출 실험의 공통 실험 조건

Factor	Range
Acid Concentration(M)	3
Size of Glass Scrap(cm)	1 X 1
Leaching Temperature(℃)	75
Leaching Time(h)	2
Agitation(rpm)	400 ~ 500
Solid-Liquid Ratio(%)	50
Drying Time(h)	24
Drying Temperature(℃)	25(상온)

침출 실험의 구체적인 실험 방법은 다음과 같다.

- (1) 용출 실험 장비를 그림 9.c와 같이 장착
- (2) 폐 디스플레이 패널 유리 스크랩과 침출 용액을 혼합
  - ① 침출 용액 농도 변화 조건
    - 유리 스크랩 50 g, 1 ~ 5 M HCl 용액 100 mL
  - ② 침출 용액 종류 변화 조건
    - 유리 스크랩 50 g, 3 M HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>COOH 용액 100 mL
  - ③ 침출 유리 스크랩 크기 변화 조건
    - 유리 스크랩 50 g(2.2 X 1.2, 1.0 X 1.0, 0.8 X 0.6, < 0.8 X 0.6), 3 M HCl 용액 100 mL
- (3) 75 °C에서 400 ~ 500 rpm 으로 2 시간 동안 가열 및 교반
- (4) 가열 후 용액을 거름종이에 필터링
- (5) 필터링 후 스크랩을 25°C(상온)에서 24 시간 동안 건조
- (6) 필터링 후 용액 ICP 분석

그림 9는 폐 디스플레이 패널 유리 스크랩으로부터 인듐 침출 실험 과정을 자세히 나타낸 것이다.



그림 9. 폐 디스플레이 패널 유리 스크랩으로부터 인듐 추출 실험 과정

## 2. 침출 최적화 실험

### 1) 전처리 - 패널 유리 파·분쇄

패 디스플레이 패널 유리 스크랩으로부터 희소금속인 인듐을 침출하는 실험을 하기 전에 침출이 용이하도록 유리 스크랩을 파·분쇄하는 전처리 과정을 진행하였다. 본 실험에서는 유리 파·분쇄를 하기 위하여 체임버의 최대 용량이 3.5 L이고, 2 개의 날개를 가진 스테인리스 칼날이 장착된 믹서와 고에너지 볼밀을 사용하였다.

우선, 시작크기가 대략 가로, 세로 4 X 4 cm<sup>9)</sup>인 디스플레이 패널 유리 300 g과 스파크 생성 방지를 위해 물 150 ~ 200 mL를 믹서 체임버에 넣고 3 분여 동안 기계를 작동시켰다. 분쇄가 끝난 후 여과지를 이용하여 스크랩과 물을 분리시킨 후 24 시간 동안 건조시켰다.

건조된 유리는 체를 이용하여 크기별로 나누었고, 실험에 사용한 체는 아래 표 4에 나타내었다. 표 4의 1, 2번 체는 제대로 분쇄되지 않은 커다란 크기의 유리 스크랩을 거르기 위한 목적으로 사용하였고, 이렇게 얻어진 스크랩은 고에너지 볼밀을 사용하여 재분쇄하였다. 고에너지 볼밀을 사용하여 파쇄하는 경우에는 볼밀 자(Jar)에 패널 유리 30 g과 약 100 ~ 150 개의 볼을 넣고 8 분여 동안 밀링하였다. 밀링이 끝나면 파우더 형태의 유리 스크랩을 체를 이용하여 크기별로 분리하였다.

그림 10은 파·분쇄한 스크랩을 체로 분리하는 과정을 나타낸 것이다.

---

9) Zhang et al. (2017)에서는 LCD 패널을 잘게 부수지 않고 상온에서 4 X 4 cm의 크기의 패널 유리를 초음파 교반을 하며 HCl로 침출하는 방법을 소개하고 있다. 이 실험의 조건을 차용하여 LCD 패널 유리의 시작크기를 가로, 세로 4 X 4 cm로 설정하였다.

표 4. 폐 디스플레이 유리 스크랩을 크기별로 분류 시 사용한  
체의 크기

	ASTM E11	Aperture (mm)
1	No. 7	2.8
2	No. 12	1.7
3	No. 18	1.0
4	No. 30	0.6
5	No. 50	0.3

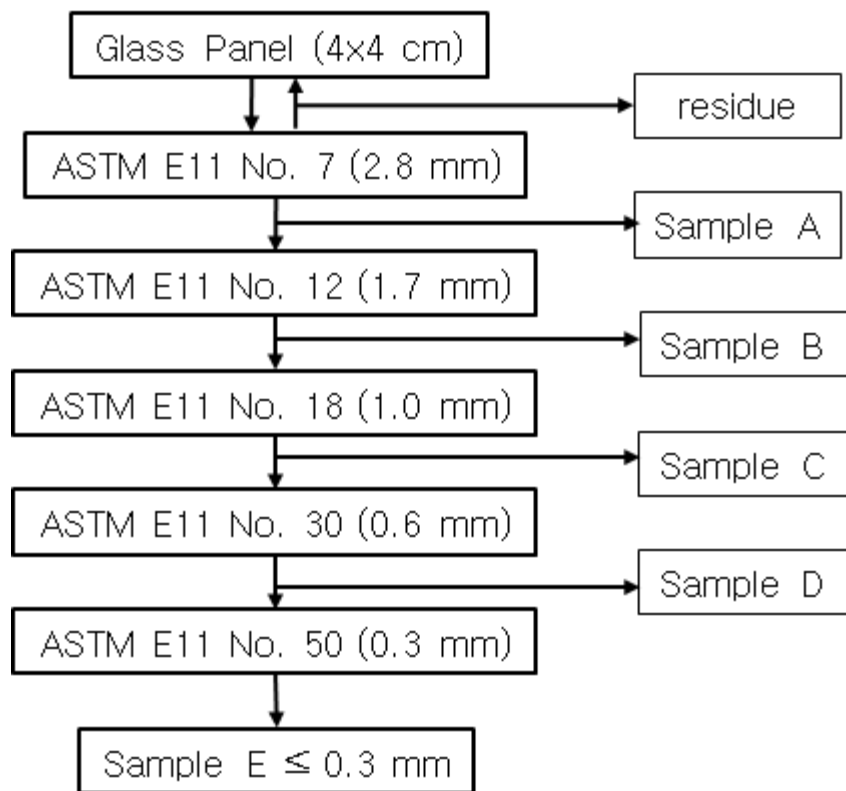


그림 10. 파·분쇄 패널 유리의 분리 과정

## 2) 시료 및 시약 준비

본 연구에서는 폐 디스플레이 유리 스크랩으로부터 희소금속인 인듐을 침출의 최적 조건을 알아보기 위하여 그림 10과 같은 분리 과정을 거쳐 얻은 Sample B ~ E 4 가지 크기의 유리 스크랩을 침출 실험에 사용하였다. 침출 용액으로는 Hydrochloric acid (HCl, 36.5 ~ 38 %, J.T.Baker, ACS), Sulfuric acid (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 95 %, DAEJUNG, GR), Nitric acid (HNO<sub>3</sub>, 69 ~ 70 %, J.T.Baker, ACS)와 같은 3 가지 산을 5 M의 농도로 희석하여 사용하였다.

## 3) 실험 장치

인듐 침출을 위하여 실험 장치를 기존 실험과 같이 그림 8과 같이 세팅하였다. 500 mL 3-neck 플라스크를 실험 체임버로 사용하였고, 침출 용액인 산으로 인해 부식되는 것을 방지하기 위해서 테플론 소재의 임펠러를 사용하였다. 온도 조절이 가능한 히팅 맨틀로 체임버를 가열하면서 오버헤드 스티어로 교반하였다. 콘덴서를 장착하여 가열로 인한 손실을 줄이고자 하였다.

#### 4) 침출 공정

침출 실험은 총 12가지 종류로 진행되었다. 실험 변수로 유리 스크랩의 크기 변화와 침출 산 용액 변화를 설정하여, 인듐 용출량의 변화를 알아보 고자 하였다. 침출 용액으로는 HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub> 등의 3 가지의 산을 사용 하였다. Swain et al. (2016)은 LCD 유리로부터 침출 시간, 침출 용액의 농 도, 침출 온도 등의 조건변화를 통하여 침출 최적 조건을 파악하고자 하였 다. 본 연구에서는 실험 변수 외에 해당 연구의 최적 조건을 차용하였으며, 자세한 침출 실험 조건을 표 5 ~ 6에 나타내었다.

표 5. 침출 실험의 유리 스크랩 크기와 침출 용액 변화 조건

Acid Size (mm)	HCl	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HNO <sub>3</sub>
> 1.0	실험 1	실험 5	실험 9
> 0.6	실험 2	실험 6	실험 10
> 0.3	실험 3	실험 7	실험 11
< 0.3	실험 4	실험 8	실험 12

표 6. 침출 최적화 실험의 공통 실험 조건(Swain et al., 2016)

Factor	Range
Acid Concentration(M)	5
Leaching Temperature(℃)	75
Leaching Time(h)	2
Agitation(rpm)	400 ~ 500
Solid-Liquid Ratio(%)	50
Drying Time(h)	24
Drying Temperature(℃)	25(상온)

실험 1 ~ 12의 구체적인 실험 방법은 다음과 같다.

- (1) 용출 실험 장비를 그림 9.c와 같이 장착
- (2) 폐 디스플레이 패널 유리 스크랩 50 g과 침출 용액을 혼합
  - 실험 1, 5, 9 : > 1.0 mm 스크랩, 5 M HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,  
HNO<sub>3</sub> 용액 100 mL
  - 실험 2, 6, 10 : > 0.6 mm 스크랩, 5 M HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,  
HNO<sub>3</sub> 용액 100 mL
  - 실험 3, 7, 11 : > 0.3 mm 스크랩, 5 M HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,  
HNO<sub>3</sub> 용액 100 mL
  - 실험 4, 8, 12 : < 0.3 mm 스크랩, 5 M HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,  
HNO<sub>3</sub> 용액 100 mL
- (3) 75 °C에서 400 ~ 500 rpm 으로 2 시간 동안 가열 및 교반
- (4) 가열 후 용액을 거름종이에 필터링
- (5) 필터링 후 스크랩을 25°C(상온)에서 24 시간 동안 건조
- (6) 필터링 후 용액 ICP 분석

### 3. 용매추출 실험

#### 1) 시료 및 시약 준비

본 연구에서는 실제 산업 공정 폐액에서 간단한 습식공정을 통해 인듐을 회수하기 위한 기초 연구로서, A 업체의 인듐 회수 공정 중에 발생하는 공정 폐액을 원료 물질로 사용하였다.

추출제 용액으로는 Di-(2-ethylhexyl)phosphoric acid (D2EHPA, 95 %, (주)마이닝캠)를 사용하였고, 희석제 용액으로는 Hydrotreated kerosene (ESCAID 110, 100 %, (주)마이닝캠)을 사용하였다. Sodium hydroxide (NaOH (bead), 97 %, DAEJUNG, EP)을 10 M 수용액으로 만들어서 폐액의 pH를 조정하는데 사용하였다.

#### 2) 실험 장치

인듐 용매추출을 위하여 실험 장치를 그림 11과 같이 세팅하였다. 400 mL 비커를 실험 체임버로 사용하였고, 공정 폐액의 용매추출 전과 후 pH를 측정하기 위해서 pH Meter를 설치하였다. 마그네틱 바와 자력 교반기를 사용하여 실험이 진행되는 동안 폐액과 추출제가 분리되어 층을 이루지 않고 골고루 섞일 수 있도록 하였다.

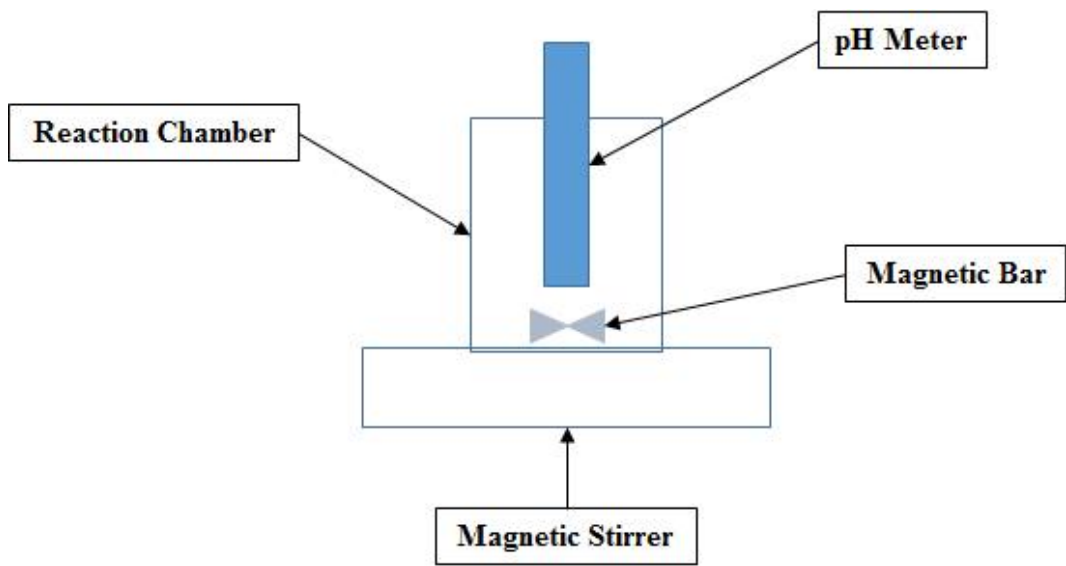


그림 11. 용매추출 실험 장치 모식도

### 3) 용매추출 공정

용매추출 실험은 총 5가지 종류로 진행되었다. 실험 변수로 공정 폐액의 pH를 설정하여 pH - 0.5, 0, 1, 2, 3으로 변화시켰으며 이에 따른 인듐 용매 추출량의 변화를 알아보려고 하였다. 추출제로 D2EHPA와 ESCAID 110를 혼합하여 사용하였다. Pereira et al. (2018)은 폐 휴대전화의 LCD로부터 상비, 반응시간, D2EHPA 농도 등의 조건변화를 통하여 용출 특성을 파악하고자 하였다. 본 연구에서는 실험 변수 외에 해당 연구의 조건을 참고 및 변형하여 사용하였다. 자세한 용매추출 실험 조건을 표 7 ~ 8에 나타내었다. 폐액을 A 용액, 혼합 추출제를 O 용액으로 표시하였다.

표 7. 용매추출 실험 pH 조건

#	pH
실험 A	- 0.5
실험 B	0
실험 C	1
실험 D	2
실험 E	3

표 8. 용매추출 실험의 공통 실험 조건(Pereira et al. 2018 변형)

Factor	Range
Reaction Temperature(°C)	25(Room Temperature)
Reaction Time(min)	5
Agitation(rpm)	800 ~ 900
A/O Ratio	1
Diluted D2EHPA Ratio(v/v %)	20

실험 A ~ E의 구체적인 실험 방법은 다음과 같고, 추출제는 20 v/v %, A 용액과 O 용액은 부피비 1 : 1로 혼합하여 반응시켰다.

- (1) pH 미터 교정
- (2) 공정 폐액 초기 샘플 채취
- (3) 용매추출 실험 장비를 그림 12.a와 같이 세팅
- (4) 공정 폐액 100 mL를 교반시켜주며 10 M NaOH를 사용하여 제시된 pH로 조정
  - 실험 A ~ E : pH - 0.5, 0, 1, 2, 3
- (5) 상온에서 300 ~ 400 rpm으로 1 시간 동안 교반 및 안정화
- (6) 10 M NaOH를 사용하여 2차로 pH 조정
- (7) 추출제 100 mL 첨가 후 800 ~ 900 rpm으로 5분간 반응
- (8) 분별깔때기를 사용하여 A 용액과 O 용액 분리
  - 분리하는 과정에서 거름종이를 이용하여 서로 섞이지 않게 함
- (9) 분리 후 A 용액 pH 측정 및 ICP 분석

그림 12는 인듐 회수 공정 폐액으로부터 인듐 용매추출 실험 과정을 자세 히 나타낸 것이다.



**a. measure adjusted pH**



**b. stirring**



**c. A/O separation**



**d. measure pH after SX**

그림 12. 인듐 회수 공정 폐액으로부터 인듐 용매추출 실험 과정

## IV. 실험 결과 및 고찰

### 1. 폐 디스플레이 유리 스크랩으로부터 인듐 침출 실험

본 연구에서는 폐 디스플레이 유리 스크랩으로부터 희소금속인 인듐을 침출의 최적조건을 찾기 전 인듐 침출량에 가장 큰 영향을 미치는 변수를 찾기 위한 예비 실험을 진행하였다. 먼저 침출 용액의 농도를 실험 변수로 설정하였으며, 실험은 총 4 가지 종류로 진행되었다. 침출 용액은 HCl 이고, 용액의 농도를 1 ~ 4 M로 변화시키며 인듐 침출량의 변화를 알아보려고 하였다. 해당 실험에 사용한 유리 스크랩의 크기는 가로 1 cm X 세로 1 cm 이고, 침출 실험 후 유가 금속인 인듐의 침출량을 확인하기 위하여 ICP 분석을 실시하였다.

그림 13은 침출 용액의 농도 변화에 따른 인듐 침출량을 나타낸 것이다. ICP 분석 결과, HCl의 농도가 1 M 일 때 69 ppm, 2 M 일 때 71 ppm, 3 M 일 때 78 ppm, 4 M 일 때 76 ppm 으로 측정되었다. 침출 용액의 농도 증가할수록 침출량이 소량 증가하는 경향을 나타내었다.

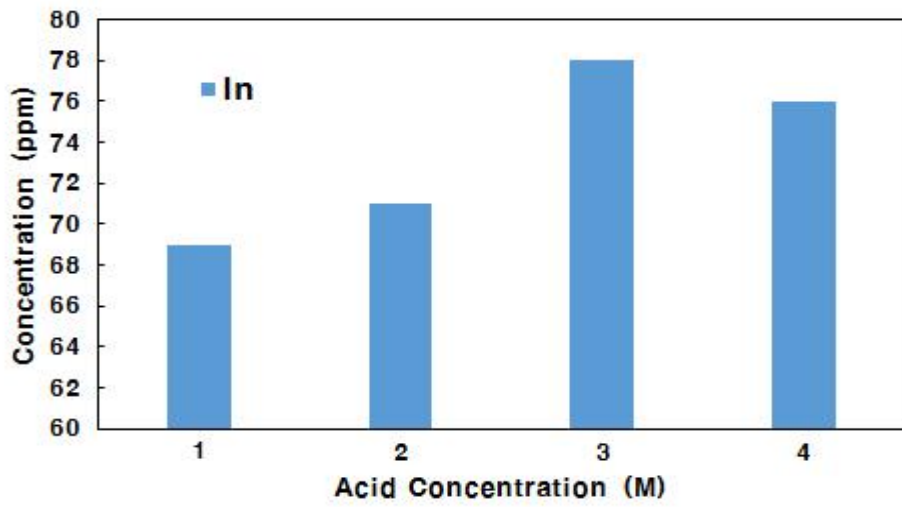


그림 13. 침출 용액 농도 변화에 따른 인듐 침출량

그림 14는 침출 용액의 종류 변화에 따른 인듐 침출량을 나타낸 것이다. 실험은 총 4 가지 종류로 진행되었다. 침출 용액의 농도는 3 M 이며, 침출 용액의 종류를 HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>COOH로 변화시키며 인듐 침출량의 변화를 알아보고자 하였다. 해당 실험에 사용한 유리 스크랩의 크기는 가로 1 cm X 세로 1 cm 이고, 침출 실험 후 인듐의 침출량을 확인하기 위하여 ICP 분석을 실시하였다. ICP 분석 결과, 침출 용액이 HCl 일 때 72 ppm, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 일 때 78 ppm, HNO<sub>3</sub> 일 때 50 ppm, CH<sub>3</sub>COOH 일 때 27 ppm 으로 측정되었고, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 일 때 침출 효율이 가장 좋게 나타났다.

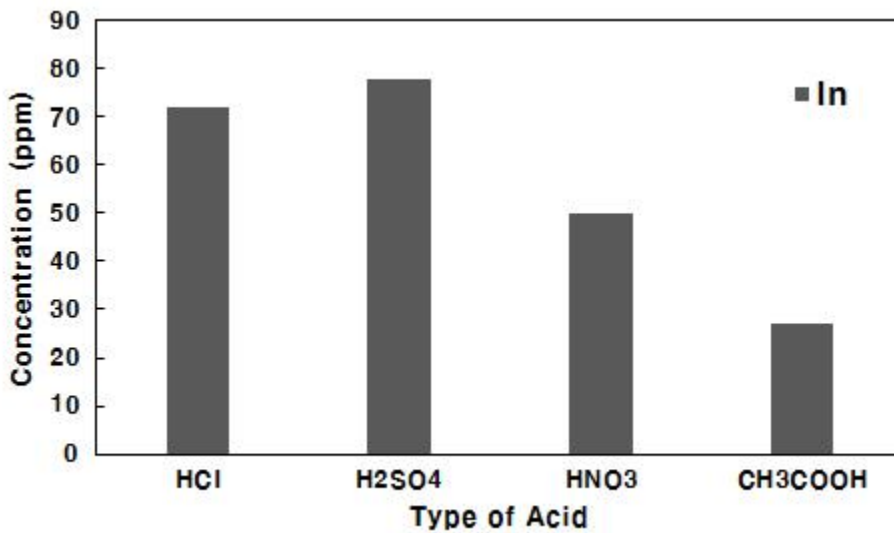


그림 14. 침출 용액 종류 변화에 따른 인듐 침출량

그림 15는 유리 스크랩 크기 변화에 따른 인듐 침출량을 나타낸 것이다. 실험은 총 4 가지 종류로 진행되었다. 침출 용액은 3 M HCl이며, 유리 스크랩의 크기를 2.2 X 1.2 cm, 1.0 X 1.0 cm, 0.8 X 0.6 cm, < 0.8 X 0.6 cm 로 변화시키며 인듐 침출량의 변화를 알아보려고 하였다. 침출 실험 후 인듐의 침출량을 확인하기 위하여 ICP 분석을 실시하였다. ICP 분석 결과, 스크랩 크기가 2.2 X 1.2 일 때 73 ppm, 1.0 X 1.0 일 때 80 ppm, 0.8 X 0.6 일 때 69 ppm, < 0.8 X 0.6 일 때 232 ppm 으로 스크랩 크기가 작아질수록 인듐 침출량이 증가하는 경향을 보였으며, 미세 입자를 침출할 경우 침출량이 급격하게 증가하는 것으로 나타났다.

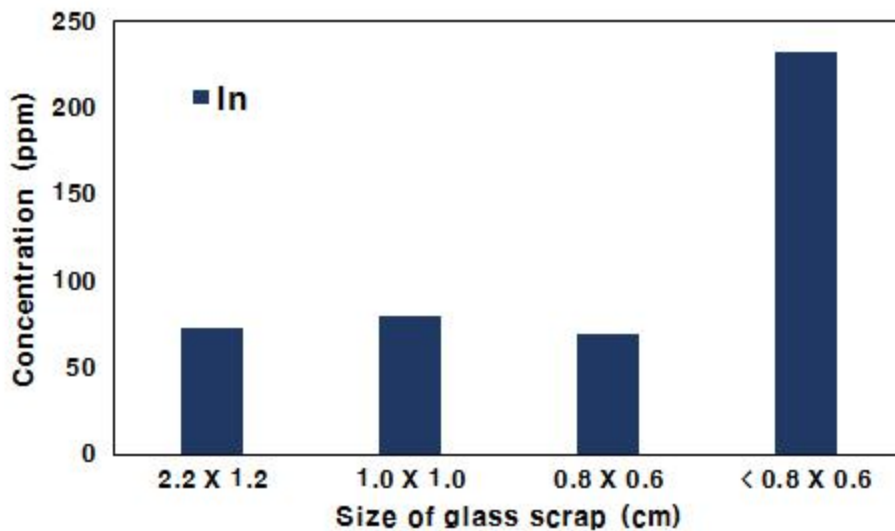


그림 15. 유리 스크랩 크기 변화에 따른 인듐 침출량

본 실험에서는 폐 디스플레이 패널 유리 스크랩으로부터 인듐을 침출하기 위한 최적 조건을 찾기 전 예비 실험으로 침출 용액 농도, 침출 용액 종류, 패널 유리 스크랩 크기 등을 변수로 하여 인듐 침출 실험을 진행하였다. 그 결과 패널 유리 스크랩의 크기가 조대할 경우, 실험 변수에 따라 인듐 침출량이 큰 변화를 보이지 않으며, 스크랩의 크기 변화가 인듐 침출량에 다른 변수들보다 큰 영향을 미친다는 사실을 발견하였다. 따라서 인듐 침출의 최적 조건을 찾기 위하여 폐 디스플레이 패널 유리 스크랩의 크기 변화를 더욱 세분화하여 분석하고자 하였으며, 최적 침출 용액 종류도 함께 분석하였다.

또한 폐 디스플레이로부터 인듐을 회수하기 위한 선행연구 중 하나인 Swain et al. (2016)은 침출 시간, 침출 용액(HCl)의 농도, LCD 유리의 양 (pulp density), 침출 온도 등의 실험 변수 중 최적 조건을 찾고자 하였는데, 본 연구의 침출 조건 최적화 실험의 신빙성을 높이고, 효율적으로 진행하기 위하여 스크랩 크기와 침출 용액 종류를 제외한 나머지 공통 조건은 본 선행연구의 조건을 차용하였다.

## 2. 폐 디스플레이 유리 스크랩으로부터 인듐 침출을 위한 최적 조건 확립

### 1) 파·분쇄 패널 유리 분류

본 연구에서는 폐 디스플레이 패널 유리 스크랩으로부터 인듐을 효과적으로 침출하기 위해서 유리 스크랩을 파·분쇄하는 전처리 과정을 진행하였다. 파·분쇄가 끝난 스크랩은 그림 10과 같은 방법으로 다양한 ASTM E11 체를 이용하여 크기별로 분류하였다. 크기별로 회수된 유리 스크랩 중 #7 ASTM E11을 사용한 분쇄가 충분히 되지 않은 residue 스크랩은 따로 분류하여 볼밀로 재분쇄하였다. 그 외 나머지의 유리 스크랩은 순서대로 Sample A > 1.7 mm, Sample B > 1.0 mm, Sample C > 0.6 mm, Sample D > 0.3 mm, Sample E ≤ 0.3 mm로 크기를 구분하였다. 그림 16은 분류가 끝난 residue, Sample A ~ E 유리 스크랩의 사진과 평균 크기를 나타낸 것이다. 이 중에서 Sample B ~ E를 침출 실험에 사용하였다.

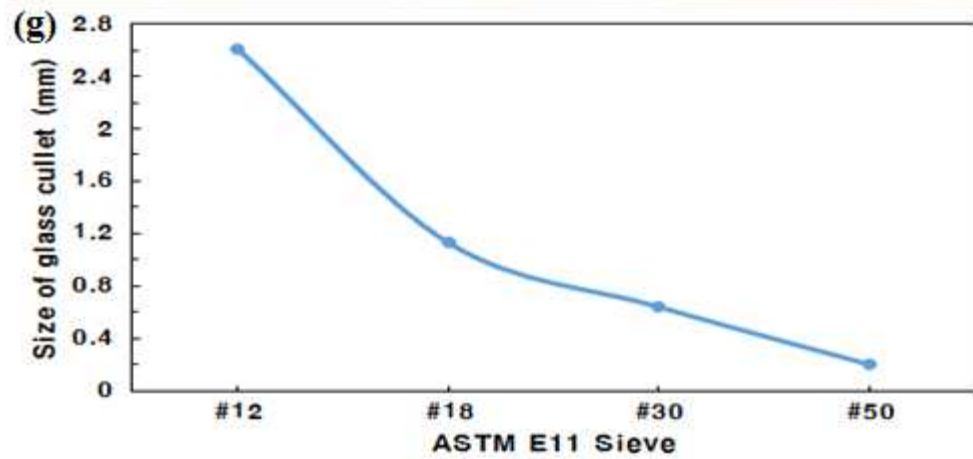
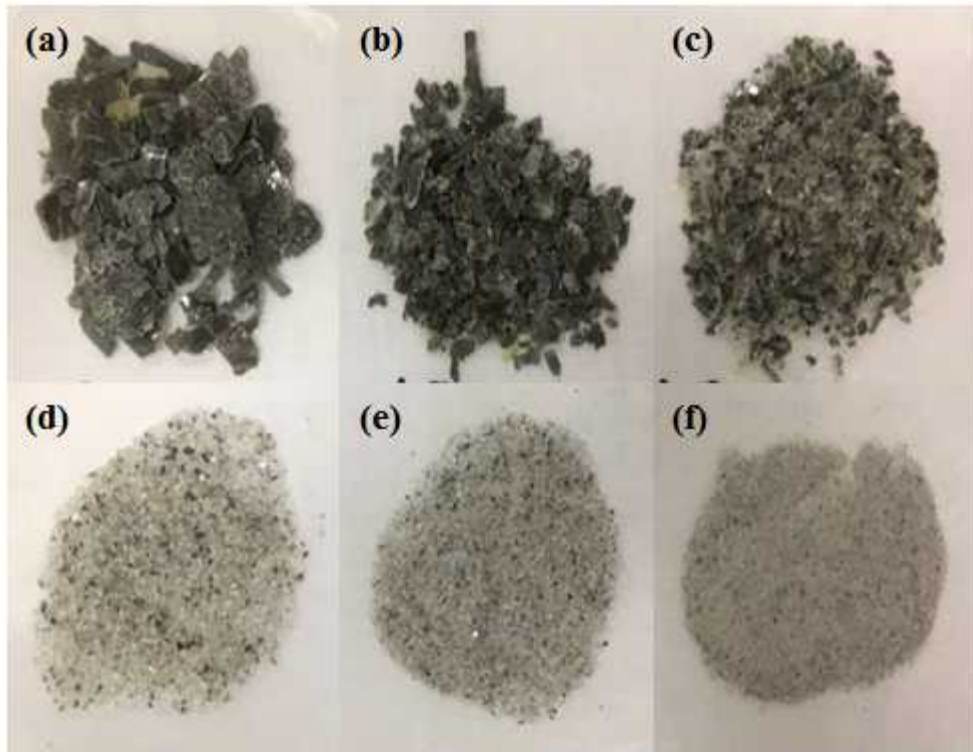


그림 16. 파·분쇄한 LCD 패널 유리를 체로 분류하였을 때 사진 (a) residue, (b) #7 ASTM E11, (c) #12 ASTM E11, (d) #18 ASTM E11, (e) #30 ASTM E11, (f) #50 ASTM E11, (g) 다양한 크기의 ASTM E11 체를 사용하여 분류한 패널 유리의 평균 크기

## 2) 유리 스크랩 크기와 침출 용액 변화에 따른 인듐 침출 거동 파악

본 연구에서는 폐 디스플레이 유리 스크랩 컬릿 크기 변화에 따른 인듐 침출량의 거동을 파악하고 침출 최적 조건을 찾고자 하였다. 일반적으로 침출 실험에는 HCl을 주로 사용하는데 본 실험에서는 침출 용액인 산의 변화에 따른 침출 특성도 함께 분석하기 위해서 실험 1 ~ 4는 HCl, 실험 5 ~ 8은 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 실험 9 ~ 12는 HNO<sub>3</sub> 을 사용하였다. 실험 변수 외의 공통 실험 조건은 표 6에 나타낸 것과 같이 침출 용액의 농도는 5 M, 가열 온도는 75 °C, 가열 시간은 2 시간, 교반 회전수는 400 ~ 500 rpm, 스크랩과 침출 용액의 고-액 비율은 50 %로 하였다.

그림 17은 침출 용액으로 HCl 을 사용하였을 때 유리 스크랩 컬릿 크기 변화에 따른 인듐 침출량을 나타낸 것이고, 유리 컬릿의 크기가 작아질수록 인듐의 침출량이 증가하는 경향을 보였다. 컬릿 크기가 B > 1.0 mm 일 때 52 ppm의 인듐 침출량을 나타내었다. 컬릿 크기가 C > 0.6 mm 일 때는 인듐 침출량이 45 ppm으로 나타나 소량 감소하는 형태를 보였다. 컬릿 크기가 D > 0.3 mm 일 때는 침출량이 67 ppm으로 다시 증가하였으며, 가장 작은 크기인 E < 0.3 mm 일 때는 침출량이 2배 이상 급증하여 최저 침출량보다 약 3배 가량 높은 150 ppm으로 측정되었다.

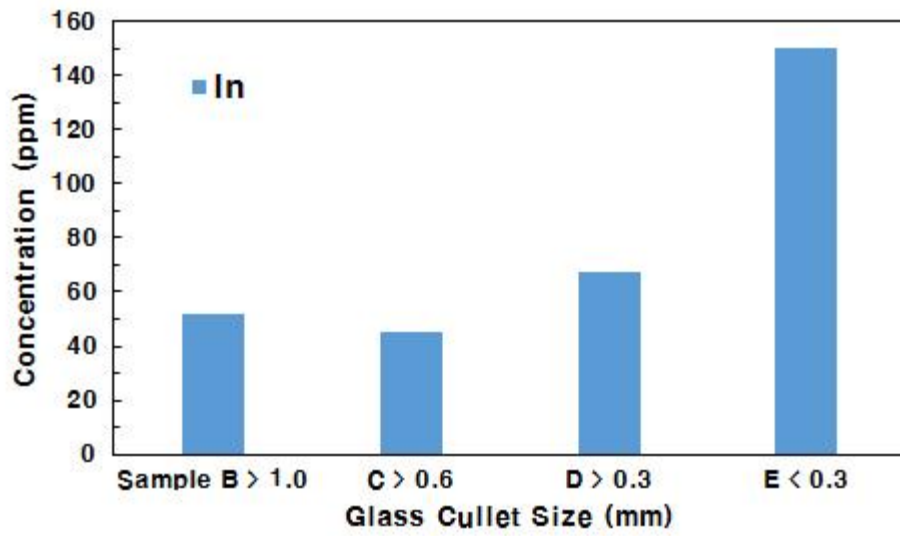


그림 17. 유리 스크랩 컬릿 크기 변화에 따른 인듐 침출량; HCl

그림 18은 침출 용액으로  $H_2SO_4$ 을 사용하였을 때 유리 스크랩 컬릿 크기 변화에 따른 인듐 침출량을 나타낸 것이다.  $H_2SO_4$ 을 사용하였을 경우 HCl 과 마찬가지로 유리 컬릿의 크기가 작아질수록 인듐의 침출량이 소량 감소 하였다가 다시 증가하는 경향을 보였다. 컬릿 크기가  $B > 1.0$  mm 일 때 46 ppm의 인듐 침출량을 나타내었다. 컬릿 크기가  $C > 0.6$  mm 일 때는 인듐 침출량이 38 ppm으로 나타나 소량 감소하는 형태를 보였다. 컬릿 크기가  $D > 0.3$  mm 일 때는 침출량이 51 ppm으로 다시 증가하였으며, 가장 작은 크기인  $E < 0.3$  mm 일 때는 이전 크기보다 침출량이 2배 정도 증가하여 113 ppm으로 HCl의 경우와 같이 최저 침출량보다 3배 가량 높게 측정되었지만 절대량에서 HCl을 사용하였을 경우의 75 % 수준으로 측정되었다.

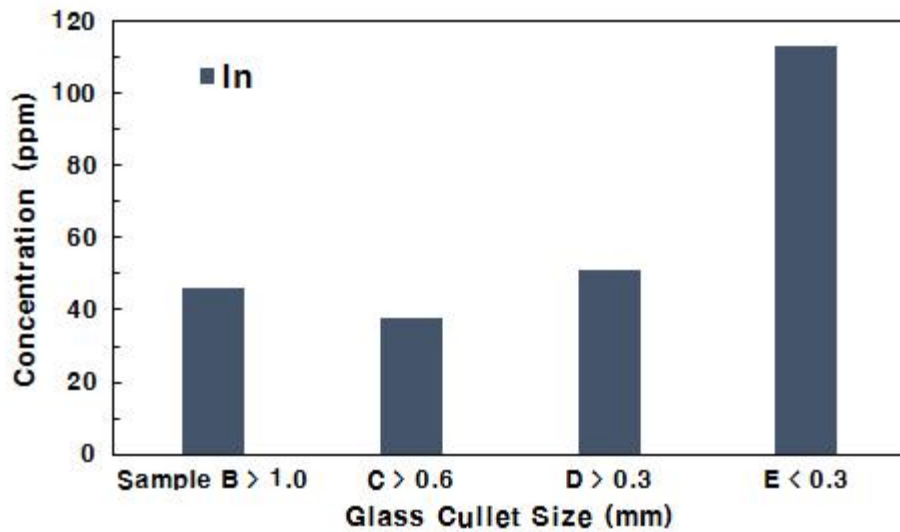


그림 18. 유리 스크랩 컬릿 크기 변화에 따른 인듐 침출량;  $H_2SO_4$

그림 19는 침출 용액으로 HNO<sub>3</sub> 을 사용하였을 때 유리 스크랩 컬릿 크기 변화에 따른 인듐 침출량을 나타낸 것이다. HNO<sub>3</sub>을 사용하였을 경우 유리 컬릿의 크기가 작아질수록 인듐의 침출량이 증가하는 특성이 이전 산 침출 용액보다 뚜렷하게 나타났다. 컬릿 크기가 B > 1.0 mm 일 때 20 ppm의 인듐 침출량을 나타내었다. 컬릿 크기가 C > 0.6 mm 일 때는 인듐 침출량이 45 ppm으로 증가하였고, 컬릿 크기가 D > 0.3 mm 일 때는 침출량이 69 ppm으로 측정되었다. 가장 작은 크기인 E < 0.3 mm 일 때는 이전 크기보다 침출량이 2배 이상 증가하여 143 ppm으로 최저 침출량보다 7배 가량 높게 측정되었다.

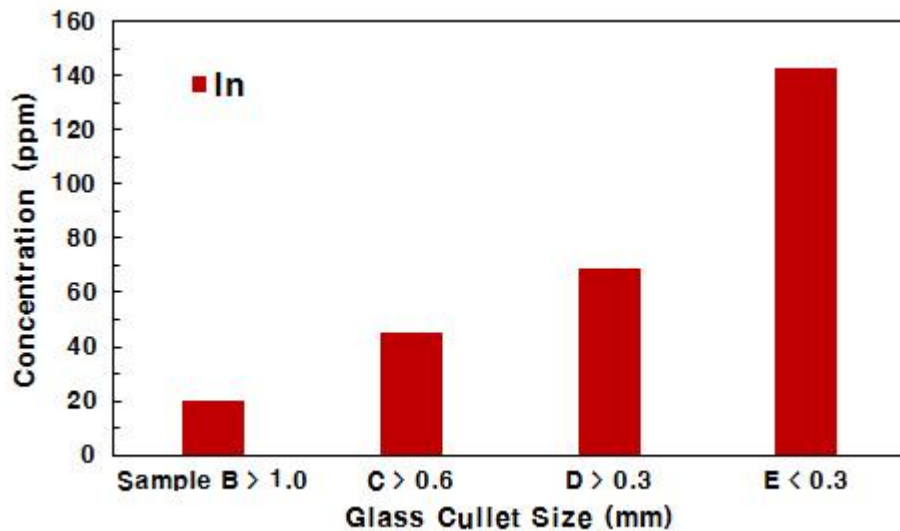


그림 19. 유리 스크랩 컬릿 크기 변화에 따른 인듐 침출량; HNO<sub>3</sub>

위의 결과들을 종합적으로 분석해보면 3 가지 산을 침출 용액으로 사용하였을 때, 모두 유리 스크랩 컬릿 크기가 작아질수록 인듐 침출량이 증가하는 경향을 보였으며 이는 스크랩의 미세화가 비표면적을 크게 만들어 반응 구동력을 높일 뿐 아니라 인듐이 표면으로 노출되어 침출이 용이했기 때문으로 보인다(김효섭 외 4인, 2011). 그림 20은 3 가지 산을 이용하여 침출하였을 때 인듐 침출량을 비교한 그래프이다. 각 실험의 최대 침출량 기준 침출에 사용한 3 가지 산의 침출 효율은  $\text{HCl} > \text{HNO}_3 > \text{H}_2\text{SO}_4$  순으로 나타낼 수 있다.

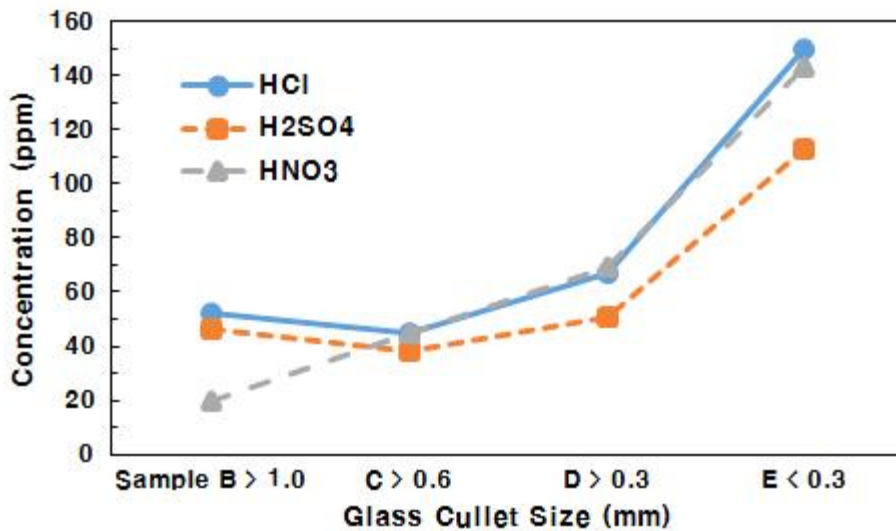


그림 20. 유리 스크랩 컬릿 크기 변화에 따른 인듐 침출량 비교

HCl 과 HNO<sub>3</sub> 으로 침출하는 경우 컬릿 크기가 0.6 mm 이하일 때 인듐 침출량이 거의 비슷한 수치로 측정되었다. 하지만 침출 타겟인 ITO는 일반적으로 약 90 %의 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 10 %의 SnO<sub>2</sub>로 구성되어 있는데 주석의 경우 HNO<sub>3</sub>으로 침출할 경우 붉은 갈색의 유독한 이산화질소(Nitrogen Dioxide, NO<sub>2</sub>)를 생성하기 때문에 다른 산 용액에 비해 침출 용액으로 부적합하다고 할 수 있다. HNO<sub>3</sub> 침출 시 이산화질소가 발생하는 반응식을 나타내면 다음과 같다(이기웅 외 4인, 2014).



따라서 본 침출 실험을 통해 Sample E < 0.3 mm 크기의 유리 스크랩 컬릿을 5 M HCl로 침출할 때 최대 인듐 침출량을 보인다는 것을 알 수 있었다.

본 침출 실험 결과 추가로 의도하지 않았던 결과도 얻을 수 있었다. 침출 실험에 사용된 LCD 유리 스크랩은 편광필름 제거 등 파·분쇄 외의 전처리 없이 사용하였는데, 컬릿 크기가 Sample D > 0.3 mm, Sample E < 0.3 mm일 때, 침출 용액의 색이 푸르게 변하는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 컬릿의 크기가 조대할 때는 나타나지 않는 현상이며 컬릿의 크기가 작아질수록 침출제와 반응하는 표면적이 넓어져 LCD 패널 내의 염료 등도 함께 침출된 것으로 보이며, 컬릿 크기가 작아질수록 인듐 침출량이 증가하는 것이 컬릿 크기의 단독적인 역할인지, 스크랩 내 추가로 침출된 물질이 침출 특성에 영향을 미치는지에 대해서는 추가적인 분석이 필요하다.

### 3. 인듐 회수 공정 폐액으로부터 인듐 추출을 위한 조건

#### 탐구

본 연구에서는 실제 업체에서 나오는 인듐 회수 공정 폐액의 pH를 변화시키며 용매추출 하였을 때 인듐 추출량의 거동을 파악하고자 하였다. 용매추출 실험은 공정 폐액의 pH를 표 7에 나타낸 것과 같이 -0.5, 0, 1, 2, 3의 5 가지로 변화시켰으며, 추출제로 D2EHPA와 ESCAID 110을 혼합하여 사용하였다. 공정 폐액을 A 용액, 혼합 추출제를 O 용액으로 표시하였으며, 실험 변수 외의 공통 실험 조건은 표 8에 나타낸 것과 같이 반응 온도는 25℃(상온), 반응 시간은 5 분, 교반 회전수는 800 ~ 900 rpm, A/O 비율은 1, D2EHPA 희석 비율은 20 v/v %로 하였다.

그림 21은 A 업체의 초기 공정 폐액에 함유되어 있는 인듐량을 나타낸 그래프이다. 동일 시료에서 총 3 번의 채취를 하여 ICP 분석하였으며, 분석한 샘플을 차례대로 A, B, C라고 하였을 때 각각 719.9 ppm, 792.1 ppm, 758.3 ppm 으로 측정되었고, 평균치인 756.8 ppm을 폐액 인듐 함유량의 기준으로 설정하였다.

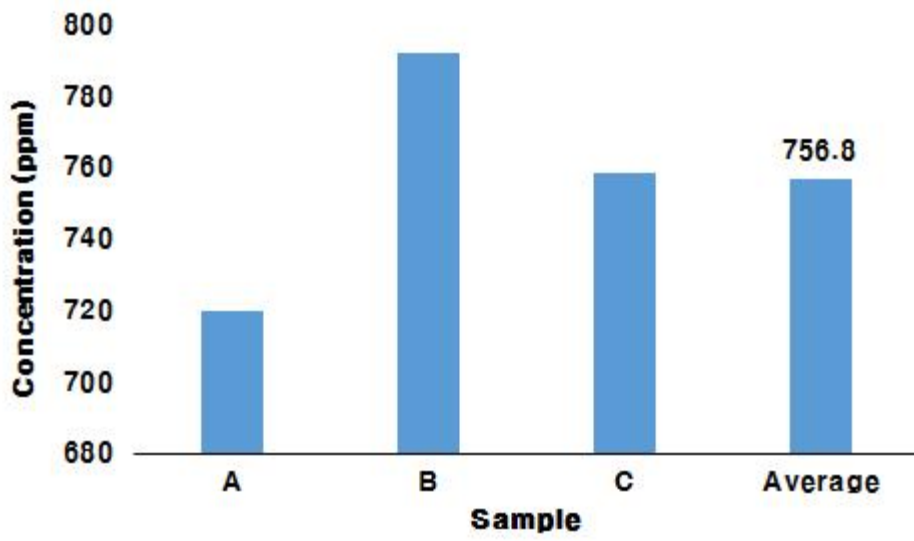


그림 21. A 업체의 공정 폐액에 포함되어 있는 인듐의 평균량

표 9는 용매추출 실험을 하였을 때의 pH 측정값과 NaOH 투입량을 종합한 표이다. 공정 폐액에 NaOH를 첨가 시 교반을 통해 안정화를 시켰는데 실험 A의 경우 실험 조건인 pH -0.5 와 유사한 값을 가져 따로 pH 조정 과정을 거치지 않고 용매추출을 진행하였다. 조정 pH 값이 커질수록 NaOH의 투입량은 증가하였으며 그 증가폭은 점점 감소하였다.

표 9. 용매추출 실험 시 초기, 조정, 용매추출 후 pH와 NaOH 투입량

실험 #	초기 pH	조정 pH	실험 후 pH	NaOH 투입량(mL)
A	-0.57	-0.52	-0.51	0
B	-0.61	-0.05	-0.26	21
C	-0.59	1.06	1.02	30
D	-0.48	2.0	1.60	33
E	-0.52	3.03	1.89	34

그림 22는 공정 폐액의 pH를 -0.5 ~ 3 의 5 가지 조건으로 변화시키며 D2EHPA와 ESCAID 110의 혼합물을 추출제로 반복 용매추출 실험 하였을 때, 추출률을 나타낸 그래프이다. 756.8 ppm이 추출되었을 경우를 추출률 100 % 하였을 때, 모든 pH 조건에서 추출제 상으로 추출되지 않은 인듐의 양은 4 ppm 미만으로 99.5 % 이상의 추출률을 나타내었다.

본 연구에서는 폐유리 공정 폐액의 pH 변화에 따른 인듐 용매추출량의 거동을 파악하고자 하였는데, 실험 결과 해당 공정 폐액은 pH에 상관없이 추출제 D2EHPA에 대하여 높은 추출률을 보이는 것으로 관찰되었다. 이러한 본 연구 결과는 추후 해당 용매추출 용액의 인듐 외 불순물 원소 함유율에 대한 추가 분석을 통해 고순도 인듐 회수를 위한 자료로 활용할 수 있을 것이다.

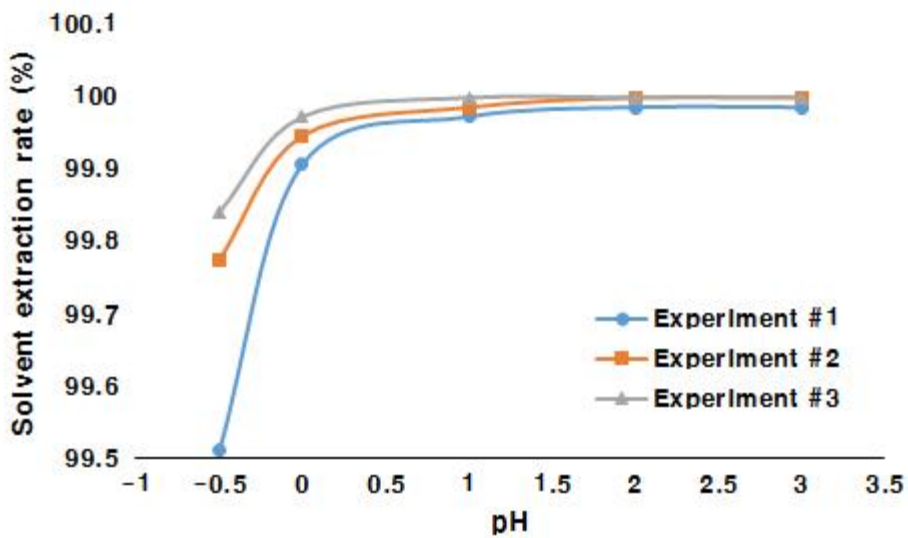


그림 22. 용매추출 반복실험 결과 용매추출률 그래프

## V. 결론

본 연구에서는 폐 디스플레이 유리 스크랩으로부터 인듐 침출의 최적 조건 확립을 위한 전처리 및 침출 실험과 실제 폐유리 공정 폐액의 용매추출 조건 변화에 따른 인듐 추출량 거동 파악을 위한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 예비 실험 결과, 유리 스크랩 크기가 조대할 경우에는 침출 용액의 농도, 침출 용액의 종류 등의 실험 변수가 인듐 침출량에 큰 변화를 나타내지 못하며, 유리 스크랩의 크기 변화가 인듐 침출량 거동에 다른 변수들보다 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.
- (2) 디스플레이 패널 유리 스크랩 컬릿 크기 변화에 따른 인듐 침출 특성을 파악하기 위하여 유리를 파·분쇄하는 전처리 과정을 진행하였으며, 침출 용액 변화에 따른 인듐 침출량의 변화도 함께 관찰하였다. 실험 결과 HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub> 모든 침출 용액 조건에서 스크랩 컬릿의 크기가 작아질수록 인듐 침출량이 증가하는 경향을 보였다. 이는 스크랩의 미세화가 비표면적을 크게 만들어 반응구동력을 높일 뿐 아니라 인듐이 표면으로 노출되어 침출이 용이했기 때문으로 보인다.
- (3) 가장 작은 크기인  $E < 0.3$  mm를 기준으로 인듐 침출량을 비교하면 HCl일 때 150 ppm, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>일 때 113 ppm, HNO<sub>3</sub>일 때 143 ppm으로 침출 효율은 HCl > HNO<sub>3</sub> > H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 순으로 나타났다.

- (4) HCl과 HNO<sub>3</sub>의 경우 컬릿 크기가 0.6 mm 이하일 때 인듐 침출량의 차이가 적은 것으로 나타났는데 약 90 %의 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 10 %의 SnO<sub>2</sub>로 구성된 ITO의 특성상 Sn의 경우 HNO<sub>3</sub>으로 침출할 경우 붉은 갈색의 유독한 NO<sub>2</sub>를 생성하기 때문에 침출 용액으로는 HCl이 적합하다고 할 수 있다.
- (5) 본 연구의 디스플레이 패널 유리 스크랩 컬릿 크기와 침출 용액 변화에 따른 침출 거동 분석에 의하면 표 6과 같은 고-액 비율 50 %, 침출 온도 75 °C, 침출 시간 2 시간, 교반 속도 400 ~ 500 rpm의 공통 실험 조건에서 컬릿 크기는 Sample E < 0.3 mm, 침출 용액은 HCl 일 때 최적의 침출 특성을 나타내었다.
- (6) 본 침출 실험에 사용된 LCD 유리 스크랩은 편광필름 제거 등 파·분쇄 외의 전처리 없이 사용하였는데, 컬릿 크기가 Sample D > 0.3 mm, Sample E < 0.3 mm일 때, 침출 용액의 색이 푸르게 변하는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 컬릿의 크기가 조대할 때는 나타나지 않는 현상이며 컬릿의 크기가 작아질수록 침출제와 반응하는 표면적이 넓어져 LCD 패널 내의 염료 등도 함께 침출된 것으로 보이며, 침출 특성에 미치는 영향에 대해서는 추가적인 분석이 필요하다.
- (7) 실제 폐유리 공정 폐액의 pH 조건 변화에 따른 인듐 용매추출량 거동 파악을 위한 실험을 진행하였다. A 업체의 초기 공정 폐액 내 인듐 함유량의 평균을 756.8 ppm이라고 할 때, 모든 pH 조건에서 추출제 상으로 추출되지 않은 인듐의 양은 4 ppm 미만으로 99.5 % 이상의 추출률을 나타내었다.

(8) 해당 공정 폐액은 추가적인 pH 조정 과정 없이도 추출제 D2EHPA에 대하여 높은 추출률을 보이는 것으로 관찰되었다. 이러한 연구 결과를 추후 폐유리 공정 폐액으로부터 고순도 인듐을 회수하는 공정 플랜트를 위한 기초 자료로 활용하기 위해서는 회수되는 인듐 외 불순물 함유량에 대한 추가적인 분석 및 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- 강이승, 신동윤, 이지은, 안중우, 홍현선 (2015). 페디스플레이 CCFL에 존재하는 형광체 내 희토류 원소 회수 기술 동향 분석. 한국분말야금학회지, 22(1), 27-31.
- 국가기술표준원 (2017). KATS 기술보고서 ‘차세대 디스플레이 산업현황 및 표준화 동향’.
- 김성규, 이화영 (2000). D2EHPA에 의한 인디움의 용매추출에 관한 연구. 대한금속·재료학회지, 38(6), 851-857.
- 김정곤 (2012). 인듐 물질흐름 분석을 통한 재자원화 분석 및 향후 발전 방향. 한국분말야금학회지, 19(1), 72-78.
- 김효섭, 성준제, 이철희, 홍현선, 홍순직 (2011). 고에너지 밀링으로 제조된 페디스플레이 패널 분말의 밀링시간에 따른 인듐 용출특성. 한국분말야금학회지, 18(4), 378-384.
- 삼성경제연구소 (2011). 도시광산 내 희소금속의 잠재가치 평가 - 한·일 비교를 중심으로-.
- 엄성현, 조정수, 이수영 (2015). 페 디스플레이 재활용을 위한 인듐 회수기술. 공업화학, 26(4), 389-393.
- 연구개발특구진흥재단 (2018). ‘디스플레이 재료 시장’ 연구개발특구기술 글로벌 시장동향 보고서.
- 오재현, 김준수, 문석민, 민지원 (2010). 도시광산(사용후제품) 재자원화의 필요성과 배경. 자원리싸이클링, 19(5), 13-24.
- 이기웅, 김홍인, 손현태, 안재우, 김용환 (2014). 페 ITO 슬러지로부터 주석과 인듐의 분리·회수. 자원리싸이클링, 23(2), 53-60.
- 이만승, 안중관 (2015). 염산용액에서 용매추출에 의한 인듐으로부터 주석의

- 분리. 대한금속·재료학회지, 53(7), 488-494.
- 이영인, 좌용호 (2012). 폐 인듐주석산화물 타겟의 재활용 기술. 한국재료학회지, 22(4), 174-179.
- 이희민, 홍현선, 정항철, 강홍윤, 홍순직 (2010). 사용 후 LCD 제품의 희소금속 재자원화 기술 동향. 한국분말야금학회지, 17(2), 88-100.
- 한국디스플레이산업협회 (2018). 디스플레이산업 주요 통계 2018년 3분기.  
한국디스플레이산업협회 [www.kdia.org](http://www.kdia.org)
- 한국무역보험공사 (2018). 차세대 디스플레이산업 기술 및 시장 동향.  
한국희소금속산업기술센터 [www.kiram.re.kr](http://www.kiram.re.kr)
- 홍현선, 이희민, 공만식, 강홍윤 (2010). 폐 LCD 재활용 기술 현황과 전망. 한국지구시스템공학회지, 47(5), 619-627.
- Alfantazi, A. M. and Moskalyk, R. R. (2003). Processing of indium: a review. *Minerals Engineering*, 16, 687-694.
- Alguacil, F. J. (1999). Solvent extraction of indium (III) by LIX 973N. *Hydrometallurgy*, 51, 97-102.
- Cossu, R. and Williams, I. D. (2015). Urban mining: Concepts, terminology, challenges. *Waste Management*, 45, 1-3.
- European Commission (2015). Report on Critical raw materials for the EU. Brussels, Belgium.
- Fontana, D., Forte, F., Carolis, R. De and Grosso, M. (2015). Materials recovery from waste liquid crystal displays: A focus on indium. *Waste Management*, 45, 325-333.
- Gupta, B., Deep, A. and Malik, P. (2004). Liquid-liquid extraction and recovery of indium using Cyanex 923. *Analytica Chimica Acta*, 513, 463-471.

- Jiang, J., Liang, D. and Zhong, Q. (2011). Precipitation of indium using sodium tripolyphosphate. *Hydrometallurgy*, 106, 165-169.
- Li, X., Deng, Z., Li, C., Wei, C., Li, M., Fan, G. and Rong, H. (2015). Direct solvent extraction of indium from a zinc residue reductive leach solution by D2EHPA. *Hydrometallurgy*, 156, 1-5.
- Li, X., Wei, C., Deng, Z., Li, C., Fan, G., Rong, H. and Zhang, F. (2015). Extraction and separation of indium and copper from zinc residue leach liquor by solvent extraction. *Separation and Purification Technology*, 156, 348-355.
- Li, Y., Liu, Z., Li, Q., Liu, Z. and Zeng, L. (2011). Recovery of indium from used indium-tin oxide (ITO) targets. *Hydrometallurgy*, 105, 207-212.
- LG OLED light [www.lgoledlight.com](http://www.lgoledlight.com)
- Lupi, C. and Pilone, D. (2014). In(III) hydrometallurgical recovery from secondary materials by solvent extraction. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2, 100-104.
- Ma, E. and Xu, Z. (2013). Technological process and optimum design of organic materials vacuum pyrolysis and indium chlorinated separation from waste liquid crystal display panels. *Journal of Hazardous Materials*, 263(2), 610-617.
- Paiva, A. (2001). Recovery of indium from aqueous solutions by solvent extraction. *Separation Science and Technology*, 36(7), 1395-1419.
- Park, S. K., Roh, Y. M., Lee, S. G., Kim, J. Y., Shin, C. H. and Ahn, J. W. (2007). Recovery of Acid, Indium and Tin from Waste Solution of ITO Etchant. *RIST Journal of R&D*, 21(4), 352-356.

- Pereira, E. B., Suliman, A. L., Tanabe, E. H. and Bertuol, D. A. (2018). Recovery of indium from liquid crystal displays of discarded mobile phones using solvent extraction. *Minerals Engineering*, 119, 67-72.
- R&D 정보센터 (2016). 고부가 폐자원 에너지화/자원순환 육성정책 및 기술 동향과 시장전망. 지식산업정보원.
- Rocchetti, L., Amato, A., Fonti, C., Ubaldini, S., Michelis, I. D., Kopacek, B., Vegliò, F. and Beolchini, F. (2015). Cross-current leaching of indium from end-of life LCD panels. *Waste Management*, 42, 180-187.
- Ruan, J., Guo, Y. and Qiao, Q. (2012). Recovery of indium from scrap TFT-LCDs by solvent extraction. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 545-551.
- Sawai, J., Rahman, I. M. M., Tsukagoshi, Y., Wakabayashi, T., Maki, T., Mizutani, S. and Hasegawa, H. (2015). Selective recovery of indium from lead-smelting dust. *Chemical Engineering Journal*, 277, 219-228.
- Swain, B., Mishra, C., Hong, H. S. and Cho, S. -S. (2016). Beneficiation and recovery of indium from liquid-crystal-display glass by hydrometallurgy. *Waste Management*, 57, 207-214.
- USGS (2018). Mineral Commodity Summaries. Virginia, United States.
- Virolainen, S., Ibane, D. and Paatero, E. (2011). Recovery of indium from indium tin oxide by solvent extraction. *Hydrometallurgy*, 107, 56-61.
- Wang, L. and Lee, M. (2013). Recovery of Indium from Secondary

- Resources by Hydrometallurgical Method. *Journal of the Korean Institute of Resources Recycling*, 22(2), 3-10.
- Yang, J., Retegan, T. and Ekberg, C. (2013). Indium recovery from discarded LCD panel glass by solvent extraction. *Hydrometallurgy*, 137, 68-77.
- Zhang, K., Li, B., Wu, Y., Wang, W., Li, R., Zhang, Y. N. and Zuo. T. (2017). Recycling of indium from waste LCD: A promising non-crushing leaching with the aid of ultrasonic wave. *Waste Management*, 64, 236-243.
- Zhang, Y., Jin, B., Ma, B. and Feng, X. (2017). Separation of indium from lead smelting hazardous dust via leaching and solvent extraction. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5, 2182-2188.

## ABSTRACT

### Study on optimization of hydrometallurgical process for indium recovery from waste LCD glass scrap

Kim, Mi So

Department of Next-generation Applied Science

Graduate School of

Sungshin University

In this study, two types of experiments were performed as a way to effectively recover indium from the waste LCD glass scrap containing indium tin oxide(ITO). First, the effects of changes in the size of glass scrap cullet and types of leachant on the indium leaching properties were investigated. The leaching experiments showed the smaller the sizes of the glass scrap cullet, the higher amount of leached indium. In the aspect of leaching efficiency, it follows the order of  $\text{HCl} > \text{HNO}_3 > \text{H}_2\text{SO}_4$ . Secondly, as a basic study for harvesting indium from the indium-containing waste fluid through a simple hydrometallurgical process, the effect of pH in the waste fluid were observed. When the average amount of indium in the initial waste fluid was 756.8 ppm, every quantity of indium except less than 4 ppm was moved from solution phase to extractant phase at all pH conditions. These results

indicated to show high extraction rate for D2EHPA without additional pH adjustment. It is deemed necessary to further analyze and investigate the amount of impurities other than the recovered indium in order to utilize the results of this study as a basis for the plants that recover indium of high purity from waste materials.

**Keywords:** Indium, Recycling, Leaching, Solvent extraction, Hydrometallurgy